

Systém rekuperace vzduchu v pneumatických obvodech

Air Recuperation System in Pneumatic Systems

Veselský Tomáš

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. David Vala

Ostrava, 2021

Rád bych jmenovitě poděkoval panu inženýru Filipu Škeříkovi a firmě Festo, s.r.o. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce a panu inženýru Davidu Valovi za vedení mé práce. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mě při tvorbě této práce podporovali.

Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je seznámení se s problematikou stlačeného vzduchu jako pracovního média, problematiky pneumatických a elektropneumatických systémů a navržení a sestrojení rekuperačního systému pro snížení nákladů na výrobu stlačeného vzduchu. Práce popisuje vlastnosti stlačeného vzduchu, funkci jednotlivých komponentů použitých v této práci, výběr vhodných průmyslových komponent pro testování rekuperačního systému, návrh rekuperačního systému a celého elektropneumatického zapojení pro testování. Dále tato práce posuzuje sestrojený rekuperační systém z ekonomického hlediska a účinností jednotlivých pohonů.

Klíčová slova: pneumatika, elektropneumatika, stlačený vzduch, tlakový senzor, IO-Link, průtokoměr, kompresor, rekuperace, řídicí systém, PLC, CoDeSys, tlak, průtok, Festo, spotřeba stlačeného vzduchu, rozváděcí ventily, zesilovač tlaku, optické snímače, kapacitní snímače

Abstract

The content of this thesis is to introduce the problems of compressed air as the working medium, the issue of pneumatic and electro-pneumatic systems and the design and construction of a recuperation system to reduce the cost of producing compressed air. The work describes the properties of compressed air, the function of individual components used in this work, the selection of suitable industrial components for testing the recuperation system, the design of the recuperation system and the entire electropneumatic system for testing. The work also contains the enclosed program for a programmable controller, which controls the entire testing. Furthermore, this work assesses the constructed recuperation system from the economic point of view and efficiency of individual drives.

Key words: pneumatic, electro-pneumatic, compressed air, pressure sensor, IO-Link, flow meter, compressor, recuperation, control system, PLC, CoDeSys, pressure, flow, Festo, compressed air consumption, distribution valves, pressure booster, optical sensors, capacitive sensors

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
1 ÚVOD	11
2 STLAČENÝ VZDUCH.....	12
2.1 Požadavky pro pracovní a řídicí médium	12
2.2 Základní vlastnosti stlačeného vzduchu	12
2.3 Výroba a úprava stlačeného vzduchu	14
3 PNEUMATICKÉ A ELEKTROPNEUMATICKÉ PRVKY	17
3.1 Pneumatické pohony	17
3.2 Vlastnosti válce	18
3.3 Rozváděcí ventily	21
3.4 Zpětné ventily	24
3.5 Jednocestné škrťací ventily	24
3.6 Pneumatický zesilovač tlaku	24
4 SNÍMAČE	26
4.1 Snímače poloh	26
4.2 Snímače tlaku a průtoku	28
4.3 PLC CECC-LK	29

4.4	IO – Link	30
5	NÁVRH ŘEŠENÍ	31
5.1	Výběr pohonů	31
5.2	Výběr senzorů	32
5.3	Výběr zařízení pro rekuperaci	35
5.4	Výběr pneumatických ventilů	36
5.5	Výběr kompresoru pro testování	37
5.6	Výběr PLC	38
5.7	Návrh pneumatického zapojení	38
5.8	Návrh elektrického zapojení	39
6	REALIZACE NÁVRHU	41
6.1	Popis funkce návrhu	41
6.2	Fyzické zapojení s rekuperací	41
6.3	Zapojení bez rekuperace	42
6.4	Popis programu	43
6.5	Vizualizace	44
7	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ	46
7.1	Naměřené a dopočtené hodnoty na jeden cyklus	46
7.2	Příklady výpočtů síly	47
7.3	Testování s 25 l kompresorem	47
7.4	Testování s 20 cykly	49
8	EKONOMICKÁ ÚČINNOST ZAPOJENÍ	52

8.1	Cena zapojení bez rekuperačního systému	52
8.2	Cena zapojení s rekuperačním systémem	53
8.3	Spotřeba vzduchu	54
8.4	Účinnost válců	56
9	ZÁVĚR.....	57
10	LITERATURA	58
	SEZNAM PŘÍLOH	60

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
BP	Bakalářská práce
RKP	Rekuperace
Válec	Pneumatický pohon
NO	Normálně (ve výchozím stavu) otevřený
NC	Normálně (ve výchozím stavu) uzavřený
Ventil 5/2	Rozváděcí ventil, 5 pneumatických připojení a 2 funkční stavy
Ventil 3/2	Monostabilní rozváděcí ventil, 3 pneumatické připojení a 2 funkční stavy
Ventil 5/3	Monostabilní rozváděcí ventil, 5 pneumatických připojení a 3 funkční stavy
PLC	Programovatelný automat, řídicí systém
IO-Link	Komunikační rozhraní IO-Link
1A1	Pneumatický pohon s pístnicí
2A1	Pneumatický pohon bez pístnice
1B1	Válec 1A1, koncová (výchozí) poloha – zajetý
1B2	Válec 1A1, koncová poloha – vyjetý
1B3	Snímač průtoku SFAH
1B4	Digitální snímač tlaku
2B1	Válec 2A1, koncová (výchozí) poloha – zajetý
2B2	Válec 2A1, koncová poloha – vyjetý
2B3	Manometr na vstupu 2V2
2B4	Manometr na výstupu z 2V2
2B5	Tlakový snímač SPAE
1V1	Rozváděcí ventil 2x 3/2 pro válec 1A1
2V2	Zesilovač tlaku
2V4	Rozváděcí ventil 5/2 pro válec 2A1

Seznam obrázků

Obr. 1 -	Rozsah kolísání pamb [1]	13
Obr. 2 -	Boyleův zákon [1]	13
Obr. 3 -	Jednotka pro úpravu vzduchu – součástky a schématické značky [2].....	15
Obr. 4 -	Filtr stlačeného vzduchu – průřez a symbol [1].....	15
Obr. 5 -	Regulátor tlaku (redukční ventil) s odvzdušňovacím výstupem– průřez a symbol [1].....	16
Obr. 6 -	Dvojčinný válec – průřez a symbol [1]	17
Obr. 7 -	Dvojčinný válec s tlumením v koncových polohách – průřez a symbol [1]	17
Obr. 8 -	Dvojčinný válec bez pístnice s těsnící páskou – průřez a symbol [1]	18
Obr. 9 -	Diagram závislosti průměru pístu na požadované síle a pracovním tlaku [1]	19
Obr. 10 -	Průměrná rychlost pístu bez zátěže [1]	20
Obr. 11 -	Diagram pro určení spotřeby vzduchu pneumatického válce [1]	21
Obr. 12 -	Ovládání dvojčinného válce pomocí pneumatického monostabilního ventilu 5/2 [1]	21
Obr. 13 -	Solenoidový ventil 3/2 s pilotním ventilkem, v normální poloze uzavřený, s pomocným manuálním ovládáním, s návratem pružinou; vlevo: neaktivovaný; vpravo: aktivovaný [1].....	22
Obr. 14 -	Pilotní řízení solenoidem ovládaného rozváděcího ventilu [1]	23
Obr. 15 -	Monostabilní ventil 5/2, nepřímé ovládaný solenoidem [3].....	23
Obr. 16 -	Bistabilní ventil 5/2, nepřímé ovládaný solenoidem [3]	23
Obr. 17 -	Zpětný ventil – průřez a symbol [1].....	24
Obr. 18 -	Zpětný a nastavitelný škrticí ventil – průřez a symbol [1]	24
Obr. 19 -	Vnitřní zapojení pneumatického zesilovače tlaku DPA [2].....	25
Obr. 20 -	Jazyčkové relé (normálně otevřený kontakt) – jednoduchá aplikace a symbol [1]	26
Obr. 21 -	Kapacitní bezdotykový senzor – schéma principu funkce, symbol, základní aplikace [1]	27
Obr. 22 -	Difuzní senzor – základní aplikace, symbol [1]	27
Obr. 23 -	Měřicí obvod tlakového senzoru [1].....	28
Obr. 24 -	Schéma uspořádání kalorimetrického hmotnostního senzoru [5].....	29
Obr. 25 -	Nákres PLC CECC-LK [7]	29
Obr. 26 -	DSBC-63-200-PPVA-N3 (1383585) [Interní cloud FESTO].....	31
Obr. 27 -	DGC-40-340-GF-PPV-A-EX2 (532449) [Interní cloud FESTO]	32
Obr. 28 -	SMT-8M-A-PS-24V-E-2-M8 [Interní cloud FESTO].....	32
Obr. 29 -	Kapacitní snímač polohy 178575 [Interní cloud FESTO].....	33
Obr. 30 -	Optický snímač polohy 178577 [Interní cloud FESTO]	33
Obr. 31 -	SPAE-P10R-Q4-PNLK-2.5K (8001448) [Interní cloud FESTO]	34
Obr. 32 -	SFAH-50U-Q6S-PNLK-PNVBA-M8 (8035300) [Interní cloud FESTO].....	34
Obr. 33 -	Pneumatických zesilovač tlaku DPA-63-10 (184518) [Interní cloud FESTO]	35
Obr. 34 -	Pneumatický vzdušník CRVZS-0.4 (160234) [Interní cloud FESTO]	35
Obr. 35 -	Zpětný ventil H-QS-4 (153462) [Interní cloud FESTO]	36
Obr. 36 -	VUVG-L10-T32C-AT-M5-1P3 [Interní cloud FESTO].....	36
Obr. 37 -	JMEH-5/2-1/8-P-B [Interní cloud FESTO].....	37
Obr. 38 -	JUN-AIR 6-25.....	37
Obr. 39 -	CECC-LK [Interní cloud FESTO].....	38
Obr. 40 -	Pneumatické schéma zapojení s rekuperací	39

Obr. 41 -	Elektrické zapojení.....	40
Obr. 42 -	Fotografie realizace zapojení s rekuperačním systémem	41
Obr. 43 -	Fotografie realizace zapojení bez rekuperačního systému	42
Obr. 44 -	Vizualizace z programu pro testování	45
Obr. 45 -	Průběh tlaku a aktuálního průtoku při testování s 25 l kompresorem a použitím rekuperace 48	
Obr. 46 -	Průběh tlaku a aktuálního průtoku při testování s 25 l kompresorem, bez rekuperace... 48	
Obr. 47 -	Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a použitím rekuperace, umístění 2B5 na pneumatickém připojení válce 1A1 pro zpětný pohyb	49
Obr. 48 -	Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a použitím rekuperace, umístění 2B5 na vstupu ventilu 2V4	50
Obr. 49 -	Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a bez použití rekuperace, umístění 2B5 na pneumatickém připojení válce 1A1 pro zpětný pohyb	51
Obr. 50 -	Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a bez použití rekuperace, umístění 2B5 na vstupu ventilu 2V4.....	51
Obr. 51 -	Náhled košíku za komponenty pro průmyslovou automatizaci – zapojení bez rekuperace 52	
Obr. 52 -	Cenová nabídka FESTO Didactic na didaktické snímače použité v obou zapojení	53
Obr. 53 -	Náhled košíku za komponenty pro průmyslovou automatizaci – zapojení s rekuperací..	54
Obr. 54 -	Obrázek z engineering tool – teoretická spotřeba vzduchu pro oba válce na 8 cyklů za minutu bez rekuperace [20]	55
Obr. 55 -	Obrázek z engineering tool – teoretická spotřeba vzduchu pro oba válce na 8 cyklů za minutu s rekuperací [20]	55
Obr. 56 -	Obrázek z engineering tool – teoretická spotřeba vzduchu pro oba válce na 5 cyklů za minutu bez rekuperací [20]	56

Seznam tabulek

1. Tabulka proměnných použitých v hlavním programu PLC.....43
2. Tabulka proměnných použitých ve vedlejším programu PLC pro zpracování dat ze senzorů.....44
3. Naměřené a dopočítané hodnoty z první části testování z jednoho cyklu.....46

1 Úvod

Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci s firmou Festo a zabývá se problematikou pneumatických a elektropneumatických systémů tvořenými průmyslovými komponenty. Dále se zabývá vlastnostmi a spotřebou stlačeného vzduchu jako pracovního média a řízením modulárním programovatelným automatem. Dále navržením a sestavením rekuperačního systému pro snížení nákladů na výrobu stlačeného vzduchu a poté vyhodnocením výsledků tohoto systému.

V první části teorie jsou popsány požadavky na pracovní médium, vlastnosti, výhody a nevýhody stlačeného vzduchu, dále jaké jsou požadavky na výrobu a úpravu stlačeného vzduchu.

V druhé části teorie práce jsou popsány jednotlivé pneumatické a elektropneumatické prvky, které jsou použité pro realizaci buďto testovacího nebo rekuperačního systému. Dále je popsán princip funkčnosti těchto komponentů a v některých případech i jejich vlastnosti nebo použití.

Poté následuje část výběru vhodných typů pneumatických a elektropneumatických komponentů a návrh zapojení rekuperačního systému integrovaného již v testovacím elektropneumatickém obvodu. Celé zapojení je rozdělené do dvou schémat. První schéma je pneumatické zapojení, druhé schéma je elektrické zapojení, které je ale pouze ilustrační, jelikož vstupy i výstupy jsou v praxi zapojené jinak, což je popsáno níže u popisu programu.

Další částí je samotná realizace, kde jsou přiloženy fotografie z realizace zapojení, popis programu z PLC, popis vizualizace, a nakonec přiložené výsledky z celkem tří druhů testování.

Výsledky z testování jsou popsány v další části, kde je popsán i průběh jednotlivých testování, popsáno umístění tlakového senzoru a vyjádření se k výsledkům.

Poslední částí práce je zhodnocení výsledků z testování rekuperačního systému z hlediska ekonomické účinnosti. Tato část obsahuje i cenovou nabídku jednotlivých komponentů. Dále jsou zde popsány náklady na výrobu stlačeného vzduchu za jeden den při běžných pracovních podmínkách bez rekuperačního systému, s teoreticky funkčním rekuperačním systémem a nakonec bez rekuperačního systému ale s počtem pracovních cyklů jako by v systému byl zapojen rekuperační systém.

2 Stlačený vzduch

2.1 Požadavky pro pracovní a řídicí médium

Vlastnosti a kritéria systému, které se musí brát v úvahu pro pracovní médium:

- Síla
- Zdvih
- Typ pohybu (přímočarý, kyvný, rotační)
- Rychlost
- Životnost
- Spolehlivost a přesnost
- Náklady na energii
- Operativnost
- Skladovatelnost

Vlastnosti a kritéria systému, které se musí brát v úvahu pro řídicí médium:

- Spolehlivost komponent
- Citlivost k vlivům prostředí
- Jednoduchost údržby a opravy
- Spínací časy komponent
- Rychlost signálu
- Požadavky na prostor
- Životnost
- Zaměnitelnost systému
- Požadavky na školení

[1]

2.2 Základní vlastnosti stlačeného vzduchu

2.2.1 Fyzikální zákony

Newtonův zákon popisuje vztah mezi silou, hmotností a zrychlením.

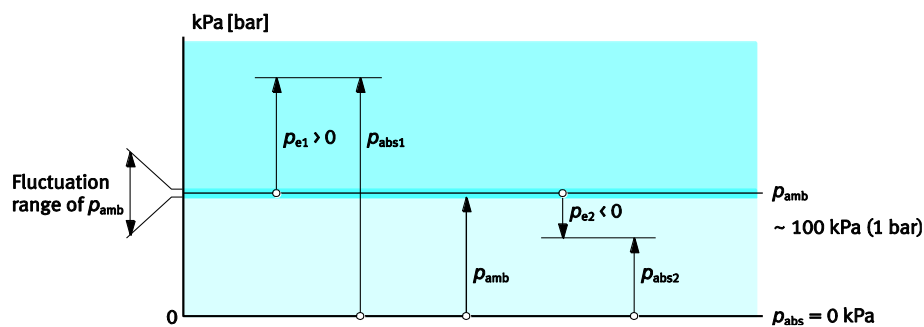
$$F = m \times a$$

Tlak:

1 Pa je roven tlaku vytvořeném silou o velikosti 1 N na plochu 1 m². Atmosférický tlak (p_{amb}) se nazývá také jako referenční tlak. Hodnoty tlaku nad oblastí atmosférického tlaku je označována jako přetlak ($p_e > 0$), hodnoty pod se nazývají hodnoty podtlaku (vakua) ($p_e < 0$).

Diferenční atmosférický tlak p_e se vypočítá podle vzorce:

$$p_e = p_{abs} - p_{amb}$$



Obr. 1 - Rozsah kolísání pamb [1]

Atmosférický tlak je proměnlivý a mění se dle počasí a geografické polohy. Hodnota nulového tlaku (vakuum) je značená jako absolutní tlak p_{abs} . Absolutní tlak se rovná součtu atmosférického tlaku a přetlaku nebo atmosférického tlaku a vakua. V praxi používané tlakoměry ukazují jen přetlak (p_e). V pneumatice jsou všechny specifikace vztahující se k množství vzduchu uváděny obvykle za tzv. normálních podmínek. Normální podmínky podle DIN 1343 jsou podmínky pro pevné, kapalně nebo plynné látky definované pomocí standardní teploty a standardního tlaku. [1]

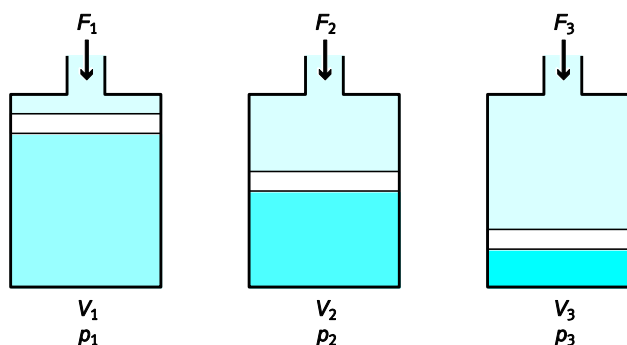
2.2.2 Vlastnosti vzduchu

Vzduch, tak jako všechny plyny nemá svou specifickou formu, mění svou formu při působení i malých vnějších sil a zaujímá tak největší možný prostor, který má k dispozici. Je charakterizován velmi nízkou soudržností molekul, takže síly mezi molekulami vzduchu můžeme v běžném pracovním režimu a podmínkách zanedbat.

Boyleův zákon:

Vzduch může být stlačován a má snahu se rozpínat. Boyleův zákon popisuje tyto vlastnosti takto: objem daného množství plynu je nepřímo úměrný absolutnímu tlaku při konstantní teplotě; nebo také jinak řečeno, součin objemu a absolutního tlaku je pro dané množství plynu konstantní. [2]

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 = p_3 \times V_3 = konst.$$



Obr. 2 - Boyleův zákon [1]

2.3 Výroba a úprava stlačeného vzduchu

Pro zajištění spolehlivosti a dlouhé životnosti pneumatického systému, se musí do něho dodávat stlačený vzduch odpovídající kvality (správný tlak, suchý a vyčištěný vzduch). Pokud se kvalita nedodrží, může to mít za následek zvýšené opotřebení jednotlivých komponent a vyšší provozní náklady. Pro přípravu stlačeného vzduchu by se měly používat tyto zařízení:

Na vstupu do pracovního:

- Filtrace
- Vhodný kompresor
- Vzdušník pro skladování stlačeného vzduchu
- Sušička

Před strojem:

- Filtr stlačeného vzduchu s odlučovačem kondenzátu
- Regulátor tlaku (redukční ventil)
- Maznice (pokud je vyžadována)
- Místa pro odvod kondenzátu, kalu

[2]

2.3.1 Kompresor

Výběr správného kompresoru ovlivňují požadavky na pracovní tlak a požadovaný objem vzduchu. Podle konstrukce jsou pak kompresory rozdělené do jednotlivých kategorií:

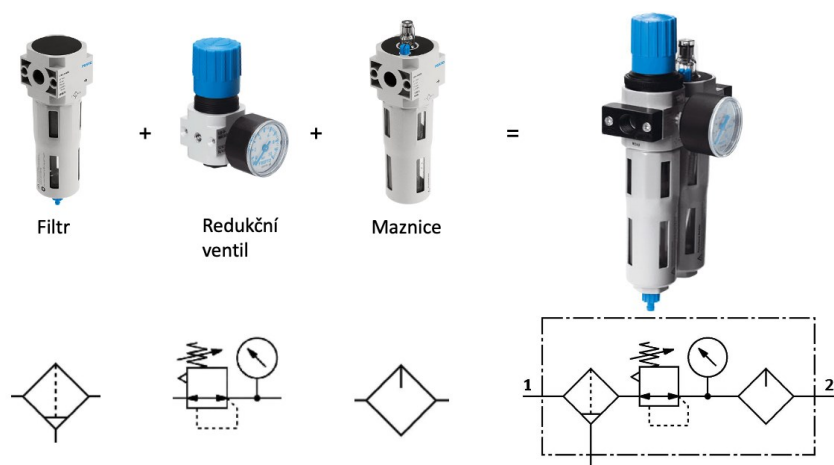
1. Zdvihové pístové kompresory
2. Rotační pístové kompresory
3. Turbokompresory

2.3.1.1 Membránový kompresor

Konstrukčně se jedná o zdvihový pístový kompresor, kde píst je oddělen od kompresorové komory membránou. Výhodou tohoto typu kompresoru je, že se olej nedostane do upraveného vzduchu. Proto je tento typ vhodný pro použití v chemickém, potravinářském nebo farmaceutickém průmyslu, kde se klade důraz na čistotu vzduchu. Vzdušník, který stabilizuje stlačený vzduch a vyrovnává tlakové kolísání je pak uložen za kompresorem. Kolísání tlaku je způsobeno rozdílným odběrem vzduchu systémem. Kompresor má nastavené dvě meze (dolní a horní mez). Když tlak ve vzdušníku klesne pod dolní mez, kompresor se sepne a začne plnit vzdušník, dokud nedosáhne tlak horní meze. Kompresor tedy nepracuje stále. [1]

2.3.2 Jednotka pro úpravu vzduchu

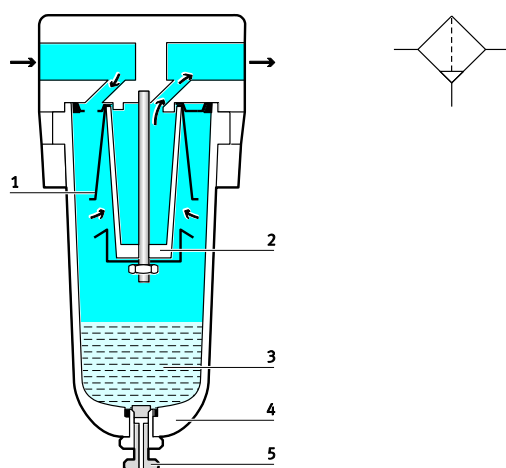
Jednotka pro úpravu vzduchu slučuje jednotlivé komponenty pro úpravu stlačeného vzduchu jako jsou: filtrace, regulace tlaku, mazání. Jednotka musí být umístěna před každým pneumatickým systémem, aby se dosáhlo vhodně upraveného vzduchu. Maznice vzduchu se již v moderních systémech moc nevyužívá, ale v případě potřeby lze použít pro pracovní část systému. Vzduch u řídicí části systému by se ale mazat nikdy neměl. [1]



Obr. 3 - Jednotka pro úpravu vzduchu – součástky a schématické značky [2]

2.3.2.1 Filtr stlačeného vzduchu

Pro zabránění opotřebení pohyblivých částí a těsnění pneumatických zařízení kondenzátem, přebytkem oleje, nečistotami se využívá filtrační jednotka stlačeného vzduchu. Pokud by se nežádoucí látky dostaly do systému, mohou uniknout přes netěsnosti a znečistit tak produkty a zařízení, které by byly poté nepoužitelné v prostředí, kde je potřeba zajistit vysokou úroveň čistoty. [1]



1: Usměrnovací vložka; 2: Filtrační vložka ze spékanych materiálů; 3: Kondenzát; 4: Filtrační miska; 5: Vypouštěcí uzávěr

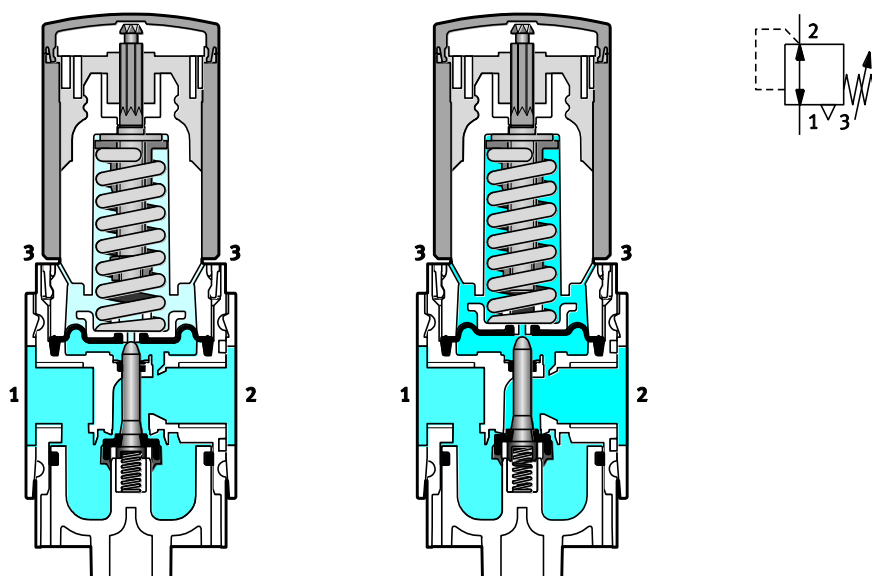
Obr. 4 - Filtr stlačeného vzduchu – průřez a symbol [1]

2.3.2.2 Regulátor tlaku (redukční ventil) s odvzdušňovacím otvorem:

Pro zajištění správné hodnoty výstupního tlaku a zabránění kolísání tlaku v rozvodném systému, které může ovlivnit spínací vlastnosti ventilů, rychlost a sílu válců, časové prodlevy a trhané pohyby pohonů, musí být jak před pneumatickým systémem, tak v celém rozvodu stlačeného vzduchu průběžně umístěné redukční ventily. Tím dosáhneme konstantní hodnoty pracovního tlaku (sekundární tlak) na vstupu do systému i v celém rozvodu vzduchu (primární tlak).

Podmínkou konstantního pracovního tlaku je zajištění vyššího primárního tlaku než sekundárního tlaku. Výhodou využití redukčního ventilu pro pracovní tlak, je nastavení ideální hodnoty tlaku pro daný pneumatický systém.

Regulace tlaku je zajištěna membránou, která se nastavuje pomocí pružiny, která je spojena se seřizovacím šroubem (viz Obr. 5). Sekundární tlak vstupuje pneumatickým šroubením "1" a sekundární tlak vystupuje pneumatickým šroubením "2". Přebytečný tlak poté vystupuje volně do atmosféry odvodovými odfuky s označením "3". Když klesne tlak na sekundární straně, síla způsobená pružinou otevře ventil a dokud nedojde k vyrovnání rozdílů tlaku, zůstane ventil otevřený. Po dosažení (vyrovnání) nastaveného tlaku se ventil uzavře. Regulace tedy probíhá opakovaným otevíráním a uzavíráním ventilu. Když vzroste tlak na sekundární straně, membrána se stlačí proti pružině, tím se výstupní průřez na sedle ventilu zmenší nebo se ventil úplně uzavře a přebytečný tlak může unikat přes odfuky volně do atmosféry. [1]



Obr. 5 - Regulátor tlaku (redukční ventil) s odvzdušňovacím výstupem– průřez a symbol [1]

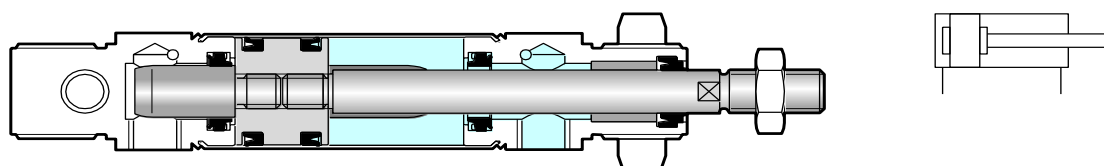
3 Pneumatické a elektropneumatické prvky

3.1 Pneumatické pohony

Pneumatický pohon nebo pracovní prvek je ovládán řídicím prvkem, reaguje na vstupní řídicí signály z řídicích prvků a převádí tak přivedenou energii na požadovanou práci. Pohony rozdělujeme do dvou skupin dle vykonávaného pohybu, a to na přímočarý pohyb, který vykonávají dvojčinné a jednočinné válce. Druhým typem vykonávaného pohybu je pohyb rotační, který vykonává vzduchový motor, rotační válec, kyvný pohon. [2]

3.1.1 Dvojčinný pneumatický válec

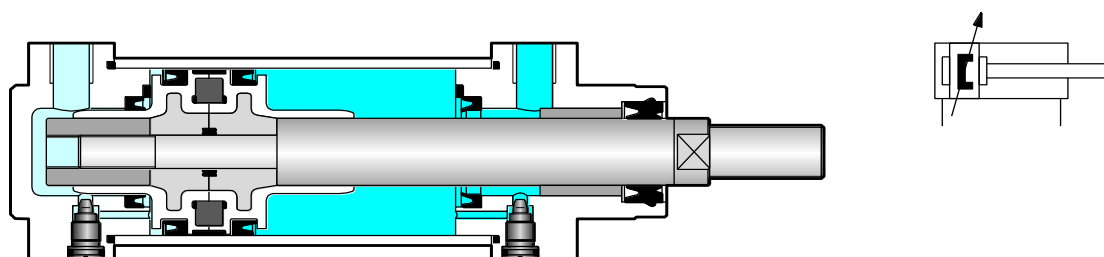
Dvojčinný válec je konstrukčně podobný válci jednočinnému, pro svůj návrat do výchozí polohy ale nevyužívá pružinu. Pro pohyb do koncové i výchozí polohy je potřeba přivést stlačený vzduch. Dvojčinný válec dokáže vykonávat práci v obou směrech svého pohybu. Síla, která je přenášena na pístnici je vyšší při pohybu dopředném než při pohybu zpětném. Je to zapříčiněno tím, že při zpětném pohybu je prostor, který se plní tlakem zmenšen objemem pístnice uvnitř válce. [1]



Obr. 6 - Dvojčinný válec – průřez a symbol [1]

3.1.2 Dvojčinný válec s tlumením v koncových polohách

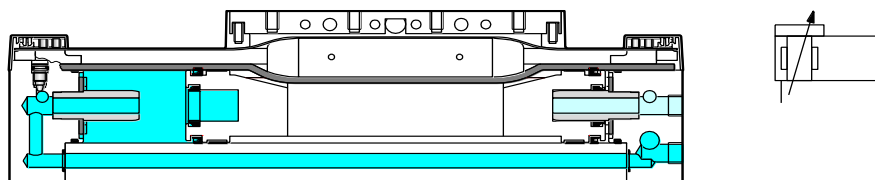
Pro zabránění rychlému opotřebení válce a rázům při pohybu s velkou zátěží se využívá tlumení v koncových polohách. Když válec téměř dosáhne své koncové polohy, píst přeruší volný odfuk do atmosféry. Vzduch tak z válce uniká skrze malý průřez ventilu, který lze nastavit. Tím se rychlost válce v koncové poloze prudce sníží. Nastavovací šroubky (u manuálně nastavitelného tlumení) nesmí být úplně utaženy, jelikož by se zabránilo plnému dosažení koncové polohy válce. [1]



Obr. 7 - Dvojčinný válec s tlumením v koncových polohách – průřez a symbol [1]

3.1.3 Dvojčinný válec bez pístnice s těsnící páskou

Oproti klasickým dvojčinným válcům s pístnicí, kde je síla přenášena na pístnici, se u bez pístnicových pohonů přenáší síla na saně, které jsou pevně mechanicky spojeny s vnitřním pístem. Spojení je realizováno skrze výřez v celé délce válce. Pomocí ocelové pásky je pak zajištěno těsnění výřezu na vnitřní straně. Z vnější strany kryje výřez pak druhá páska, která zabraňuje průniku nečistot do válce. [2]



Obr. 8 - Dvojčinný válec bez pístnice s těsnící páskou – průřez a symbol [1]

3.2 Vlastnosti válce

Pro výběr ideálního válce je třeba určit výkonové charakteristiky, které můžeme vypočítat teoreticky nebo pomocí technických údajů od výrobce. [1]

3.2.1 Síla

Síla na pístu je závislá na průměru pístu, odporu proti tření těsnících prvků a tlaku přivedeného vzduchu. Pro výpočet teoretické síly lze využít vztah:

$$F_{th} = A \cdot p$$

F_{th} Teoretická síla na pístu (N)

A Účinná plocha pístu (m^2)

p Pracovní tlak (Pa)

Pro praktické využití je důležitá efektivní síla na pístu, do které je zakomponovaný i odpor proti tření. Ten je tvořen třecí silou v normálních pracovních podmínkách (standardně od 4 do 8 bar) přibližně 10% teoretické síly na pístu. Výpočty se liší pro jednočinné i dvojčinné válce, jelikož jednočinné válce mají pružinu, která tvoří další odpor.

Jednočinné válce:

$$F_{eff} = (A \cdot p) - (F_R + F_F)$$

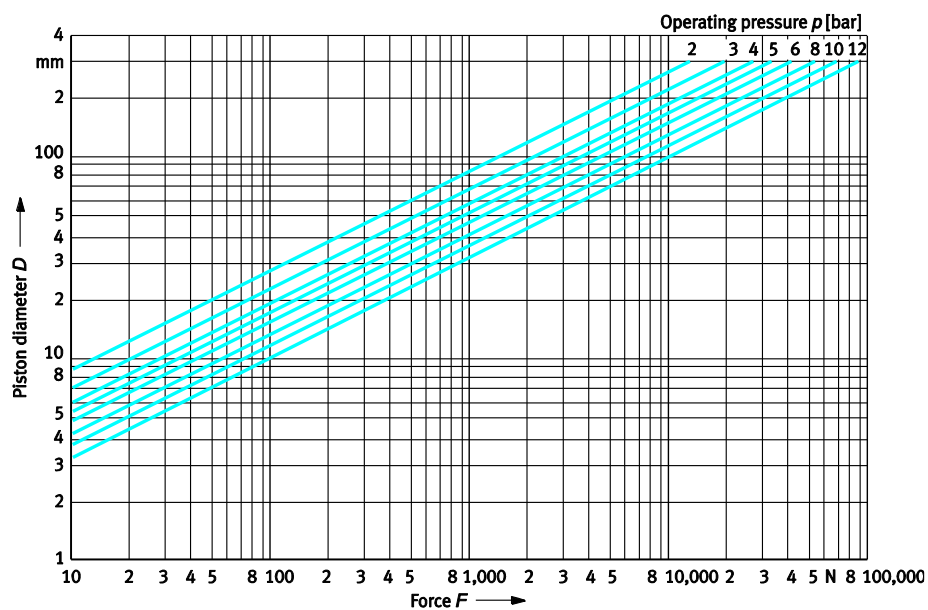
Dvojčinné válce:

Dopředný zdvih: $F_{eff} = (A \cdot p) - F_R$

Zpětný zdvih: $F_{eff} = (A' \cdot p) - F_R$

F_{eff}	Efektivní síla na pístu (N)
A	Účinná plocha pístu (m^2) = $\frac{D^2 \cdot \pi}{4}$
A'	Účinná plocha na straně pístnice (m^2) = $(D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4}$
p	Pracovní tlak (Pa)
F_R	Síla tření (přibližně 10 % z F_{th}) (N)
F_F	Síla pružiny pro zpětný pohyb (N)
D	Průměr pístu (m)
d	Průměr pístnice (m)

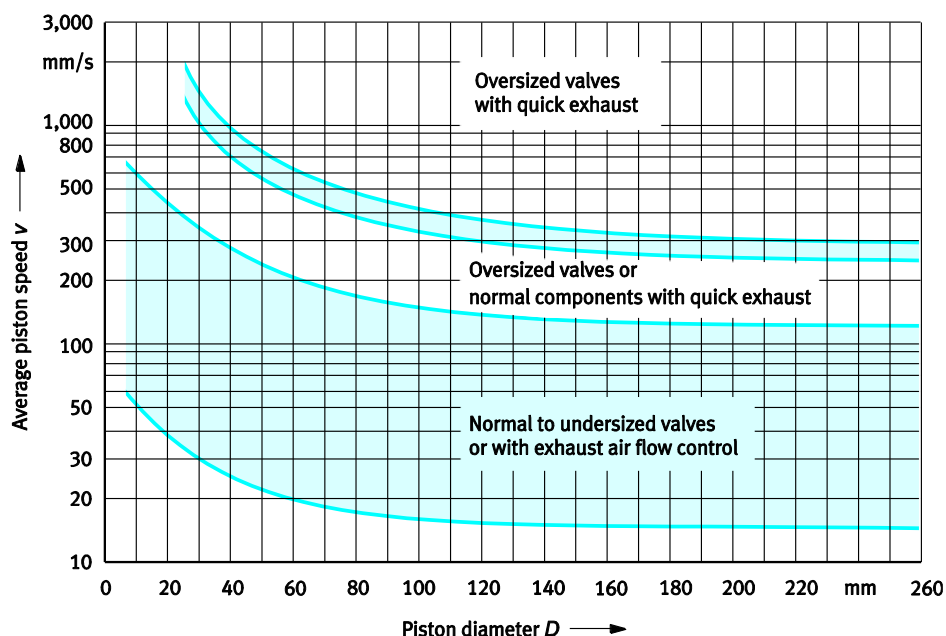
[1]



Obr. 9 - Diagram závislosti průměru pístu na požadované síle a pracovním tlaku [1]

3.2.2 Rychlost

Rychlost válců je závislá na délce a průřezu hadic mezi válcem a ventilem, průtoku ventilu, síle, která působí proti jeho pohybu a převládající velikosti tlaku. Rychlost poté ještě ovlivňuje tlumení v koncových polohách a použití speciálních ventilů pro úpravu rychlosti (škrtící ventily, rychloodvětrávací ventily). Standartní válce dosahují rychlosti od 0,1 až 1,5 ms⁻¹. Speciální (nárázové) válce mohou dosahovat rychlosti až 10 ms⁻¹. [1]



Piston diameter D – Průměr pístu D , Average piston speed v – Průměrná rychlost pístu v , Oversized valves with quick exhaust – Předimenzované ventily s rychlým odvětráním, Oversized valves or normal components with quick exhaust – Předimenzované ventily nebo normální komponenty s rychlým odvětráním, Normal to undersized valves or with exhaust air flow control – Normální nebo poddimenzované ventily nebo s řízením průtoku na odvodu

Obr. 10 - Průměrná rychlost pístu bez zátěže [1]

3.2.3 Spotřeba vzduchu

Znalost spotřeby stlačeného vzduchu v systému je důležitá pro výpočet nákladů na energii a výrobu stlačeného vzduchu. Jednotkou spotřeby jsou litry za minutu. Spotřebu vzduchu lze vypočítat pomocí vzorce:

Jednočinné válce:

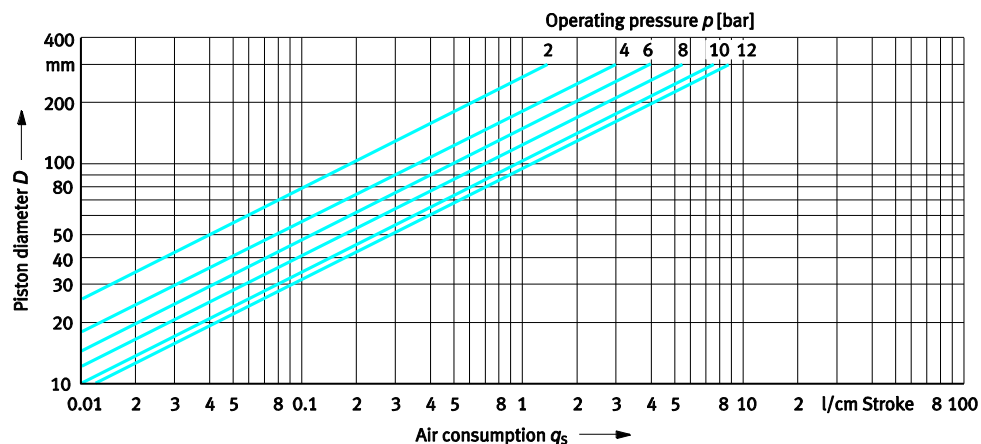
$$q_B = s \cdot n \cdot q_s$$

Dvojčinné válce:

$$q_B = 2 \cdot s \cdot n \cdot q_s$$

- q_B Spotřeba vzduchu (l/min)
- s Zdvih (cm)
- n Počet zdvihů za minutu (1/min)
- q_s Spotřeba vzduchu na cm zdvihu (l/cm)

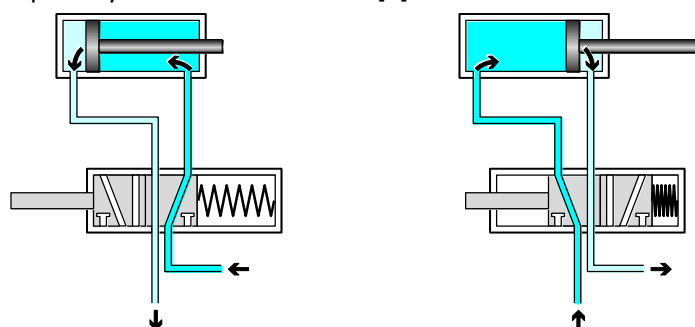
[1]



Obr. 11 -Diagram pro určení spotřeby vzduchu pneumatického válce [1]

3.3 Rozváděcí ventily

Rozváděcí ventily jsou důležitým prvkem všech pneumatických a elektropneumatických systémů. Umožňují mnoho konfigurací vnitřního uspořádání, ovládaní, pracovního tlaku, konstrukčního principu. Řídí cestu stlačeného vzduchu, tím umožňují ovládat pohyby pneumatických pohonů nebo připojovat a odpojovat přívody stlačeného vzduchu. [2]



Obr. 12 -Ovládání dvojčinného válce pomocí pneumatického monostabilního ventilu 5/2 [1]

Ventily lze rozdělit dle několika vlastností:

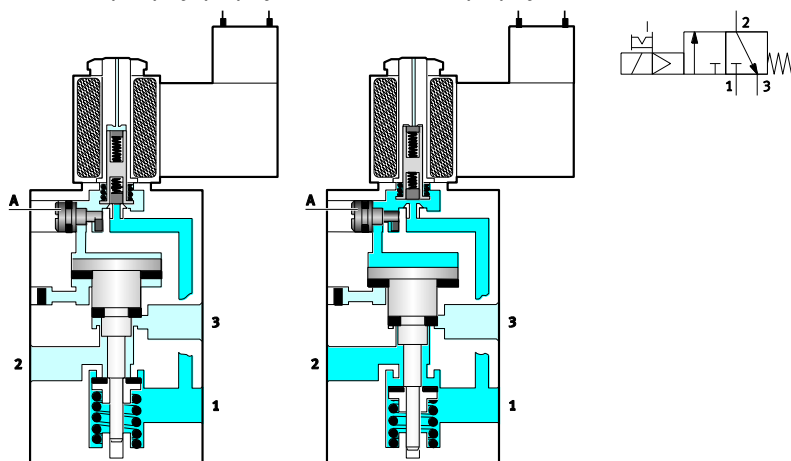
- Stabilní stavy
 - Monostabilní
 - Bistabilní
- Počet připojení a spínacích poloh (5/2, 5/3, 3/2, 4/2, aj.)
- Konstrukční princip
 - Sedlové ventily
 - Šoupátkové ventily
- Ovládání:
 - Mechanické
 - Ruční
 - Elektronické
 - Pneumatické
 - Kombinované

3.3.1 Solenoidové ventily

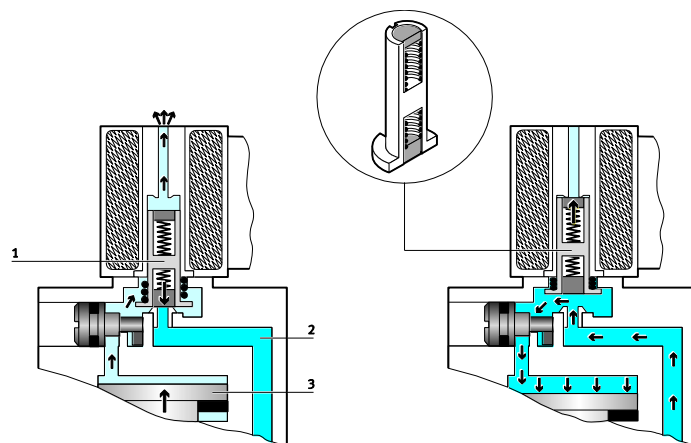
V elektropneumatických řídicích systémech pracujeme se dvěma typy energie. První typ je řídicí část, kde využíváme elektrickou energii. Druhý typ je výkonová část, kde využíváme stlačený vzduch. Pro spojení těchto dvou různých částí a energií využíváme solenoidové ventily. Ty se spínají pomocí elektrických signálů z řídicí části a rozvádí tím stlačený vzduch ve výkonové části. [3]

3.3.2 Ventily 3/2

Ventily 3/2 mají tři pneumatické přípoje a dvě funkční polohy. Slouží pro nastavování nebo mazání signálů. Ve výchozím stavu je ventil uzavřen a výstup je odvětrán do atmosféry (jen v případě ventilu NC viz Obr. 13). Po sepnutí cívky solenoidu se vtáhne vnitřní kotva do solenoidu a umožní tím projít tlaku v horní části ventilu. Tento tlak zatlačí na píst ventilu, který po svém posunutí uzavře přípoje 2 a 3 a spojí mezi sebou přípoje 1 a 2. Tento funkční stav ventilu je aktivní jen tak dlouho, dokud cívkou protéká proud. Pokud proud přestane protékat, tak zpětná pružina zatlačí vnitřní píst ventilu zpět do výchozí polohy a znovu se propojí přípoje 2 a 3, zatímco přípoje 1 a 2 se uzavrou mezi sebou. [3]



Obr. 13 - Solenoidový ventil 3/2 s pilotním ventilkem, v normální poloze uzavřený, s pomocným manuálním ovládáním, s návratem pružinou; vlevo: neaktivovaný; vpravo: aktivovaný [1]

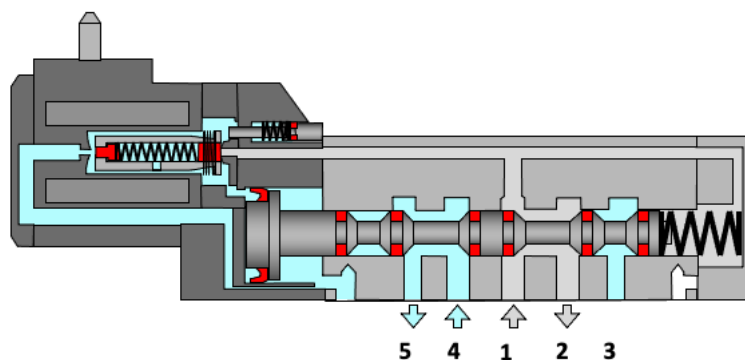


1: Kotva (armatura); 2: Kanálek pro vedení vzduchu; 3: Píst (talířová kuželka) ventilu

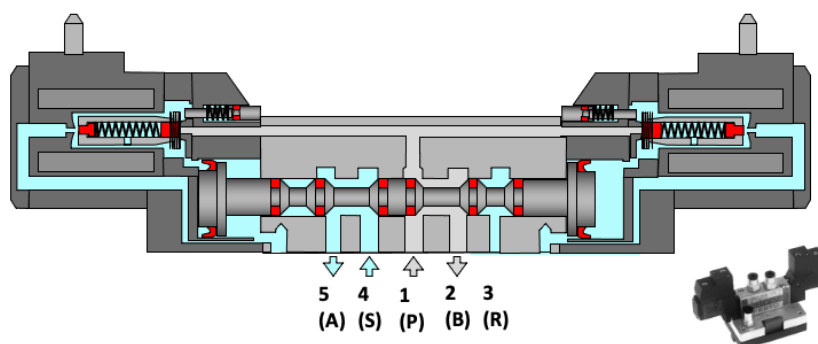
Obr. 14 - Pilotní řízení solenoidem ovládaného rozváděcího ventilu [1]

3.3.3 Ventily 5/2

Ventily 5/2 se nejčastěji používají pro ovládání pohybu pneumatických válců. Má pět pneumatických přípojů a dvě spínací polohy. Podle návratu do výchozího stavu ventilu dělíme ventily 5/2 na monostabilní nebo bistabilní. Monostabilní ventily mají pouze jednu spínací polohu stabilní. Do této stabilní polohy se vrací automaticky např. pomocí pružiny. Pokud má obě spínací polohy stabilní, jedná se o bistabilní nebo taky impulzní ventil. Ten se do výchozí polohy vrací jedním ze způsobů ovládání (solenoidem, pneumaticky, ručně). [3]



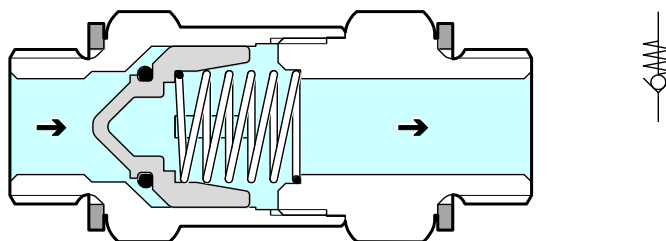
Obr. 15 - Monostabilní ventil 5/2, nepřímě ovládaný solenoidem [3]



Obr. 16 - Bistabilní ventil 5/2, nepřímě ovládaný solenoidem [3]

3.4 Zpětné ventily

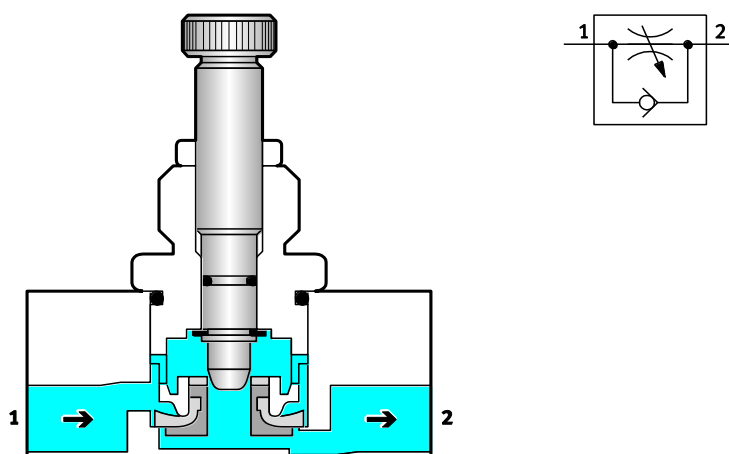
Zpětné ventily lze využít pro uzavření průtoku stlačeného vzduchu v jednom směru, zatímco v druhém směru vzduch volně proudí s minimální tlakovou ztrátou. Uzavření jednoho směru průtoku lze realizovat více způsoby a to: pomocí kužele, koule, membrány, plochého šoupěte. [2]



Obr. 17 - Zpětný ventil – průřez a symbol [1]

3.5 Jednocestné škrťací ventily

Jednocestné škrťací ventily lze použít pro úpravu rychlosti válců. Tento typ škrťacích ventilů škrťá pouze v jednom směru průtoku, ve druhém směru vzduch proudí volně. Ve směru škrzení vnitřní zpětný ventil uzavírá obtokovou cestu a díky tomu stlačený vzduch může proudit pouze skrze škrťací kanál. Tyto ventily by se měly montovat správně přímo na válec (šroubení se škrčením), v těsné blízkosti před válcem nebo na pneumatické připojení odfuku do atmosféry na rozváděčím ventilu. V případě dvojčinných válců je potřeba škrtit vzduch vystupující z válce, nikoliv vzduch vstupující do válce, aby se předešlo trhanému pohybu válce. [1]

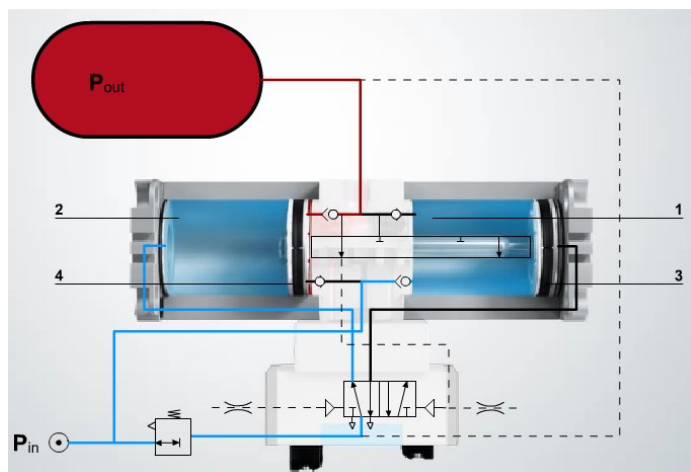


Obr. 18 - Zpětný a nastavitelný škrťací ventil – průřez a symbol [1]

3.6 Pneumatický zesilovač tlaku

Jedná se o tlakový převodník se dvěma vnitřními písty, které svým pohybem dokážou nárazově zvyšovat tlak přivedeného stlačeného vzduchu. Po přivedení vstupního tlaku P_{in} , vnitřní zpětné ventily a písty automaticky zajistí nárůst tlaku na výstupu ze zesilovače. Výstupní tlak P_{out} může dosáhnout až dvojnásobné hodnoty tlaku vstupního tlaku P_{in} . Pro nastavení vstupního tlaku slouží redukční ventil

integrováný přímo v zesilovači, který lze nastavit nastavovacím šroubem. V případě použití zesilovače bez redukčního ventilu je výstupní tlak vždy dvojnásobkem vstupního tlaku. Pohyby vnitřních pístů jsou řízené pomocí pneumatického 5/2 bistabilního ventilu, který se přepíná automaticky vždy, když dosáhnou písty koncové polohy. Zesilovač pracuje automaticky vždy když má na vstupu tlak. Pracuje tak dlouho, dokud na výstupu není požadovaný tlak nastavený redukčním ventilem. Když dosáhne požadovaného výstupního tlaku, přepne se do úsporného režimu, když výstupní tlak klesne pod požadovanou hodnotu, zesilovač začne znovu pracovat. Zesilovače tlaku nejsou konstruovány pro nepřetržitý provoz, slouží pouze pro krátkodobé zesílení tlaku, nejsou náhradou kompresorů. [4]



Obr. 19 - Vnitřní zapojení pneumatického zesilovače tlaku DPA [2]

4 Snímače

4.1 Snímače poloh

Využívají se u elektropneumatických systémů, pro kontrolu poloh a řízení pohybu válců. Výstupem může být digitální nebo analogová hodnota dle typu snímače. Snímače FESTO jsou napájené 24 V. [3]

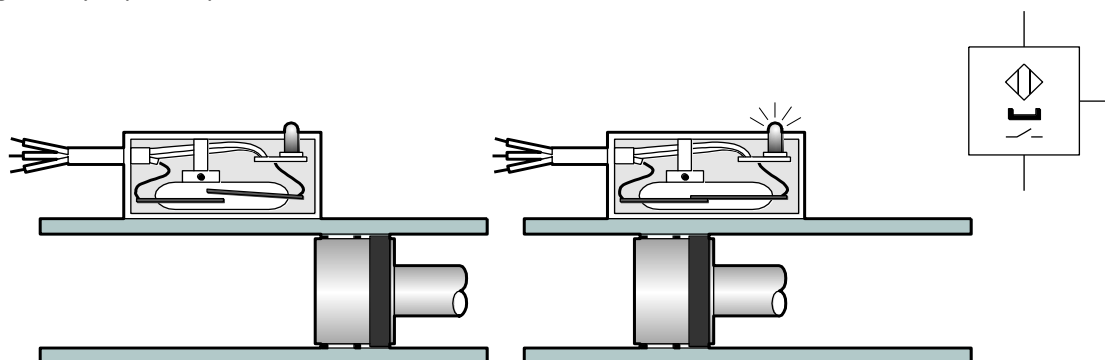
4.1.1 Magnetický snímač polohy

Principiálně se jedná o jazýčkové relé, které fungují jako magnetické bezdotykové snímače poloh válců. Snímají vnitřní píst v pohonech. Konstrukčně se skládají ze dvou jazýčkových kontaktů, které jsou ve skleněné baňce naplněné inertním plynem. Když se dostane magnetické pole pístu do blízkosti snímače, jazýčky se spojí a sepnou tím elektrický obvod. Jejich výhodou je dlouhá životnost, rychlé spínání (přibližně 0,2 ms), nevyžadují údržbu. Nevýhodou je, že se nesmí používat v prostředí, kde je silné magnetické pole.

Snímače fungují ve dvou režimech:

NO – normálně otevřený – ve výchozím stavu snímač vrací hodnotu 0

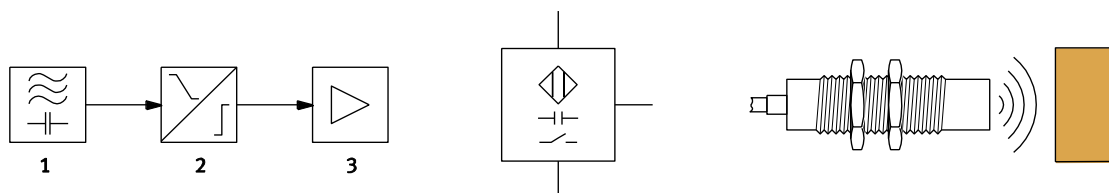
NC – normálně uzavřený – ve výchozím stavu snímač vrací hodnotu 1. Jazýčky jsou spojeny pomocí malých magnetů. Magnetické pole těchto magnetů je v případě sepnutí přerušeno silnějším magnetickým polem pístu. [1]



Obr. 20 -Jazýčkové relé (normálně otevřený kontakt) – jednoduchá aplikace a symbol [1]

4.1.2 Kapacitní snímač polohy

Snímač se skládá z kondenzátoru a odporu. Společně tak vytváří elektrický obvod pro přenos oscilací a zároveň i obvod RC oscilátoru. Mezi dvěma elektrodami (uzemňující a aktivní) se generuje elektrostatické pole, do kterého když pronikne objekt, hodnota kapacity kondenzátoru se změní, tím se utlumí oscilační obvod. Když dojde k utlumení oscilačního obvodu, tak elektronika umístěná za tímto obvodem aktivuje výstup senzorů. Výhodou tohoto snímače je, že nereaguje pouze na objekty s vysokou vodivostí ale také na izolanty s vysokou dielektrickou konstantou. [1]



1: Oscilační obvod; 2: Klopný obvod; 3: Zesilovač

Obr. 21 -Kapacitní bezdotykový senzor – schéma principu funkce, symbol, základní aplikace [1]

4.1.3 Optické bezdotykové senzory

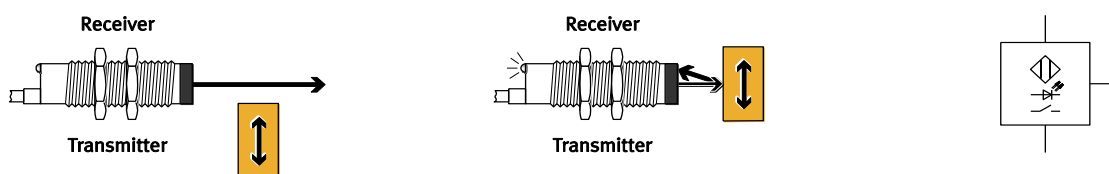
Pro svou funkci využívají senzory elektroniku spojenou s optikou. Pro detekci objektu se využívá infračervené nebo viditelné červené světlo. Jako zdroj toho světla se využívají polovodičové světlo emitující diody. Mají dlouhou životnost, jsou malé a lze je jednoduše modulovat. Jako přijímače emitovaného světla se používají fotodiody nebo fototranzistory.

Optické senzory se rozdělují na tři typy: [3]

- Světelná závora
- Reflexní světelná závora
- Reflexní spínač

Reflexní spínač (Difuzní senzor)

Tento typ optického senzoru spojuje vysílač a přijímač do jednoho pouzdra, umístěné těsně vedle sebe. Když vyslané světlo narazí na objekt, tak se světelné paprsky odrazí a vyšle zpět do senzoru. Když přijímač zjistí přítomnost těchto odražených světelných paprsků, sepne výstup senzoru. Tento typ senzoru lze využít ovšem jen tam, kde snímané části dobře odráží světlo. [1]



Transmitter – Vysílač, Receiver – Přijímač

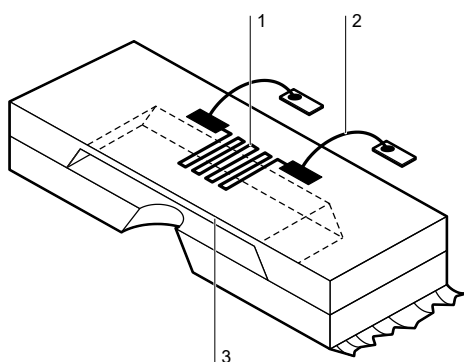
Obr. 22 -Difuzní senzor – základní aplikace, symbol [1]

4.2 Snímače tlaku a průtoku

4.2.1 Tlakový snímač SPAE

Jedná se o elektronický snímač tlaku, který k měření využívá piezorezistivní článek. Dále má snímač integrované zpracování signálů, číselnou procentní indikaci tlaku, lze ho ovládat tlačítkem, přepínat PNP/NPN režim. Pro připojení k řídicímu systému využívá rozhraní IO-Link, přes kterou lze přenést dva spínací signály, hodnotu naměřeného tlaku a provést konfiguraci snímače.

Funguje na principu membránového tlakového snímače, kde výstup je místo mechanického sepnutí aktivován elektronicky. U tohoto snímače jsou senzory tlaku připojené k membráně. Signál z tohoto senzoru je pak vyhodnocen elektronickým obvodem. Elektrický odpor piezorezistivní měřící buňky (viz obr. 24–1) změní svou hodnotu, když začne na membránu (viz obr. 24–3) působit tlak. Přes kontakty (viz obr. 24–2) je připojen odpor k vyhodnocovací elektronice, která na výstupu generuje signál. [12]



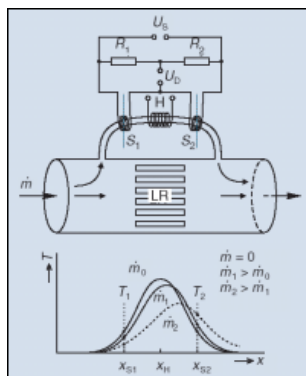
1: Rozložené odpory; 2: Kontakty; 3: Membrána

Obr. 23 - Měřicí obvod tlakového senzoru [1]

4.2.2 Průtokový snímač SFAH

Slouží ke sledování průtoku nekorozivních plynů a stlačeného vzduchu, pomocí měřící metody, která využívá přenos tepla. Tato metoda využívá vliv proudění vzduchu na šíření tepla. Konstrukčně je senzor sestaven s obtokem (bypass), takže se jedná o digitální kalorimetrický hmotnostní senzor. Proudící vzduch se v senzoru rozděluje do dvou proudících cest. Jedna je volná, kde vzduch proudí volně a druhá tenkostěnná kapilára, kde jsou umístěny měřící prvky (viz Obr. 26-S1 a S2) a topné těleso (viz Obr. 26-H). Kapilára je ohřívána topným tělesem a její teplota je snímána senzory S1 a S2. Signál z tepelných senzorů je obvykle vyhodnocován Wheatstoneovým můstkem.

Když průtokoměrem neproudí žádný vzduch, který by měnil teplotu kapiláry, jsou obě teploty (T_1 a T_2) shodné. Pokud ale průtokoměrem začne protékat i malé množství vzduchu, teploty obou tepelných senzorů (S1 a S2) budou rozdílné, respektive, teplota na senzoru S1 bude nižší než na senzoru S2, což znamená, rozdílný odpor obou senzorů. Rozdílný odpor se projeví nenulovým napětím na diagonále můstku.



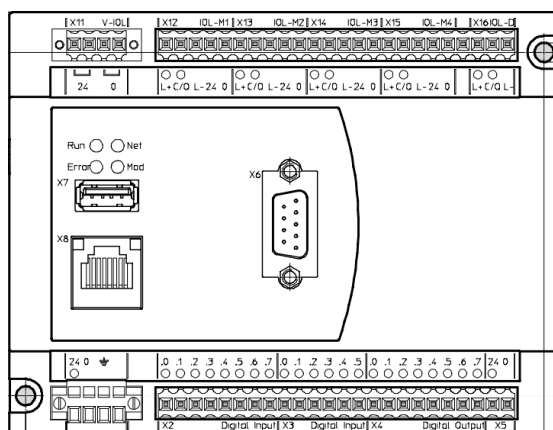
Obr. 24 - Schéma uspořádání kalorimetrického hmotnostního senzoru [5]

Digitální tepelné průtokoměry v současnosti nahrazují analogové průtokoměry. Jejich největší výhodou je programovatelnost, která umožňuje využít jeden průtokoměr na více úloh i typů pracovních medií. Další výhodou je jejich vyšší přesnost, možnost využití komunikačního rozhraní a využití více typů připojení (analogové, digitální spínání, komunikace přes sběrnice). [5, 13]

4.3 PLC CECC-LK

PLC je malý průmyslový počítač, který slouží k automatizaci procesů v reálném čase. CECC-LK od firmy FESTO je kompaktní PLC, který již obsahuje v jednom modulu procesor pro zpracování programu, vstupy, výstupy a komunikační rozhraní. PLC disponuje 12 digitálními vstupy, 8 digitálními výstupy, 4 připojeními pro IO-Link Master a jedním rozhraním IO-Link Device. Pro komunikaci s PC, kterým programujeme PLC lze využít Ethernet port.

CECC-LK programujeme skrze programovací prostředí CoDeSys, od firmy 3S-Smart Software Solution, což je univerzální programovací prostředí, které v základu splňuje standart IEC 61131-3 o programování PLC. Software CoDeSys si jednotlivé firmy kupují v základní verzi a poté si ho upraví dle svých požadavků, vytvoří si pro něj knihovny, package, pluginy. Dále CoDeSys nabízí celkem šest programových jazyků, komplexní vizualizaci, webovou vizualizaci, komunikaci s různými výrobci. [6, 7]



Obr. 25 - Nákres PLC CECC-LK [7]

4.4 IO – Link

IO-Link je typ standardizované komunikační technologie (dle normy IEC 61131-9) pro komunikaci mezi PLC a snímači, ovladači pohonů, ventilů a jiných akčních prvků. Komunikace je založena pouze na třívodičové technologii. Nejedná se ale o komunikační sběrnici, nýbrž o vylepšení dosavadní připojovací metody pro snímače a akční prvky. IO-Link je omezen maximální délkou 20 metrů. Signály posílané přes IO-Link komunikaci jsou odolnější proti rušení a nabízí možnost jednoduchých diagnostických hlášek.

Pomocí IO-Link komunikace mohou FESTO senzory jednak posílat digitální spínací/rozpínací signály, analogové signály, aktuální hodnoty veličin (dle typu senzoru), poté můžeme senzory i konfigurovat, pokud tuto možnost konfigurace nabízí. Dále můžeme skrze IO-Link provádět diagnostiku, řídit a konfigurovat speciální ventily, pneumatické ejektory, pohony, aj. [8]

5 Návrh řešení

5.1 Výběr pohonů

Pro realizaci řešení bylo třeba vybrat dva pneumatické pohony, které se používají v praxi. První válec (1A1) byl zvolen tak, aby měl dostatečně velký objem vzduchu, který je třeba pro pozdější využití. Druhý válec (2A1) musel mít objem menší než válec 1A1, aby bylo možné s ním hýbat za pomoci rekuperovaného vzduchu.

5.1.1 Pohon 1, označení 1A1 – DSBC-63-200-PPVA-N3 (1383585)

Jedná se o pneumatický přímočarý dvojčinný válec s pístnicí dle normy ISO 15552. S průměrem pístu 63mm, zdvihem 200mm a s manuálně nastavitelným pneumatickým tlumením v koncových polohách. Válec má možnost uchycení snímače přímo na těle válce.

Válec jsem zvolil, protože se jedná o normovaný válec, který se často využívá v reálném provozu a díky tomu umožňuje simulovat reálné podmínky při testování, na rozdíl od válců, které se používají jen zřídka, nebo jsou speciálně upravené na požadavky zákazníka. Druhým faktorem pro výběr byl objem válce, který činí u atmosférického tlaku 0,6234 litru při dopředném pohybu. [9]



Obr. 26 -DSBC-63-200-PPVA-N3 (1383585) [Interní cloud FESTO]

5.1.2 Pohon 2, označení 2A1 – DGC-40-340-GF-PPV-A-EX2 (532449)

Jedná se o dvojčinný pneumatický přímočarý válec bez pístnice. S průměrem 40mm, zdvihem 340mm a s manuálně nastavitelným pneumatickým tlumením v koncových polohách. Válec má možnost uchycení snímače přímo na těle válce.

Válec jsem zvolil jednak pro různorodost úlohy, protože se jedná o bezpístnicový pohon, který je vhodný pro simulaci například pneumatické výhybky, podávání nebo přesouvání výrobku a protože má objem při atmosférickém tlaku 0,4273 litru při dopředném i zpětném pohybu. Takže válec může být napájen rekuperovaným vzduchem z válce 1A1 a ještě zbývá 0,1961 litru vzduchu (při atmosférickém tlaku) jako rezerva pro vedení a funkci tlakového zesilovače. [10]



Obr. 27 -DGC-40-340-GF-PPV-A-EX2 (532449) [Interní cloud FESTO]

5.2 Výběr senzorů

Senzory v BP jsem zvolil celkem 3 různé typy pro sledování polohy válců za účelem různorodosti sensoriky v realizaci. Optický snímač a kapacitní snímač jsou vybrány i za účelem usnadnění a testování programu a zapojení, jelikož reagují i na jiné předměty než pohony nebo pístnice.

Pro měření tlaku, průtoku a pro sběr dat jsem zvolil senzory komunikující přes IO-Link, pro jednoduchou práci s daty a konfiguraci v programu. Posledním senzorem byl digitální tlakový snímač s displejem, který jen hlídal tlak na přívodu, při testování s malým kompresorem.

5.2.1 Přibližovací snímač SMT-8M-A-PS-24V-E-2-M8 (574333)

Jedná se o snímače polohy fungující na principu jazýčkového relé, které se montují přímo na válec. Tento snímač je namontován přímo ve drážce na válci 1A1 a snímá jeho výchozí polohu 1B1. Použil jsem ho, jelikož nebylo možné snímat přímo polohu pístnice senzorem indukčním nebo optickým, jelikož ty by byly sepnuté po celou dobu bez ohledu na pozici pístnice. [11]



5.2.2

Obr. 28 -SMT-8M-A-PS-24V-E-2-M8 [Interní cloud FESTO]

5.2.3 Kapacitní snímač polohy 178575

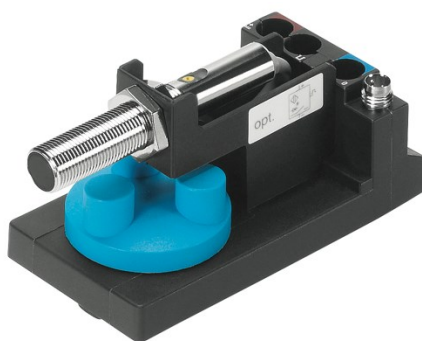
Pro snímání koncových poloh válce 2A1 jsem využil kapacitní snímače polohy, které snímají šroub, který je zašroubován v saních pohonu. Jedná se o digitální snímač se spínacím kontaktem. Tento typ kapacitního snímače se využívá v praxi, ale pro účely testování byl použit snímač, který je zasazen do didaktické nástavby, která umožňuje snadné uchycení do hliníkové profilované desky.



Obr. 29 -Kapacitní snímač polohy 178575 [Interní cloud FESTO]

5.2.4 Optický snímač polohy 178577

Pro snímání vyjeté polohy (1B2) válce 1A1 jsem využil optický snímač polohy, který snímá přímo pístnici. Jedná se o digitální snímač se spínacím kontaktem. Tento typ optického snímače se využívá v praxi, ale pro účely testování byl použit snímač, který je zasazen do didaktické nástavby, který umožňuje snadné uchycení do hliníkové profilované desky.



Obr. 30 -Optický snímač polohy 178577 [Interní cloud FESTO]

5.2.5 Tlakový snímač SPAE

Tlakový snímač SPAE jsem zvolil pro vypracování BP díky komunikaci přes IO-Link. Jelikož jsem již měl průtokový snímač, který komunikuje přes stejné rozhraní a PLC, které nemá analogový vstup. Tlakový snímač má také výhodu, že je poměrně malý a jelikož jsem ho během testování několikrát přesouval, tak další výhodou je nástrčné šroubení na průřez hadice 4mm. [12]



Obr. 31 -SPAЕ-P10R-Q4-PNLK-2.5K (8001448) [Interní cloud FESTO]

5.2.6 Průtokový snímač SFAH

Průtokový snímač SFAH od firmy FESTO je digitální průtokoměr, využívající komunikační protokol IO-Link, přes který lze sledovat aktuální hodnotu průtoku, digitální signál, analogový signál, konfigurovat průtokoměr, jednotku, ve které posílá hodnoty, konfigurovat spínací/rozpínací digitální signály, hysterezi spínání, alarmové stavy. [13]



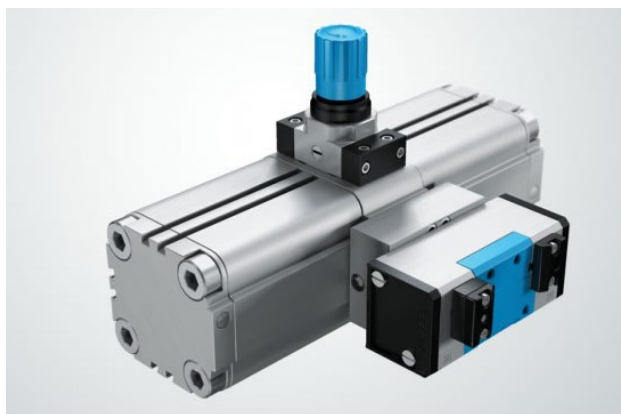
Obr. 32 -SFAH-50U-Q6S-PNLK-PNVBA-M8 (8035300) [Interní cloud FESTO]

5.3 Výběr zařízení pro rekuperaci

Zařízení rekuperující vzduch z válce 1A1 je sestaveno ze 4 pneumatických prvků. Jedná se o zesilovač tlaku, vzdušník pro rekuperovaný vzduch a dva zpětné ventily.

5.3.1 Pneumatický zesilovač tlaku DPA-63-10

Pneumatický zesilovač je hlavní částí rekuperační části systému. Odebírá vzduch z válce 1A1, zvyšuje tlak tohoto vzduchu na dvojnásobek, ten je uložen do vzdušníku a poté využit pro pohyb válce 2A1. Bez tlakového zesilovače by neměl rekuperovaný vzduch dostatečný tlak pro zajištění plynulého pohybu válce 2A1. Výhodou využití pneumatického zesilovače je mimo jiné i okamžitý odběr vzduchu z válce 1A1, což snižuje odpor vzduchu, který musí válec 1A1 překonat při dopředném pohybu, při použití rekuperačního systému. Kdyby nebyl vzduch odebírán zesilovačem a protékal přímo do vzdušníku, odpor proti pístu válce 1A1 při dopředném pohybu by narůstal a válec by ke konci pohybu neměl již vysokou účinnost. [4]



Obr. 33 -Pneumatický zesilovač tlaku DPA-63-10 (184518) [Interní cloud FESTO]

5.3.2 Pneumatický vzdušník CRVZS-0.4 (160234)

Pneumatický vzdušník jsem zvolil o objemu 0,4 litrů, jelikož válec 2A1 má téměř totožnou hodnotu objemu při atmosférickém tlaku. Vzdušník slouží pro odchycení zesíleného vzduchu ze zesilovače a uchování stlačeného vzduchu pro pozdější využití na pohyb válce 2A1. Dále také umožňuje zesílení většího objemu vzduchu z tlakového zesilovače. [14]



Obr. 34 -Pneumatický vzdušník CRVZS-0.4 (160234) [Interní cloud FESTO]

5.3.3 Zpětné ventily

Zpětné ventily jsem zvolil standardní na hadice o průřezu 4mm. V systému zajišťují průtok stlačeného vzduchu jen v jednom směru a to z válce 1A1 do zesilovače a ze zesilovače do vzdušníku. Zajišťují tak, že stlačený vzduch proudící do zesilovače se nevrátí zpět do vedení k válci 1A1 a poté zesílený stlačený vzduch ze zesilovače proteče do vzdušníku a ze vzdušníku už může téct jen do napájení ventilu u válce 2A1. [15]



Obr. 35 -Zpětný ventil H-QS-4 (153462) [Interní cloud FESTO]

5.4 Výběr pneumatických ventilů

Jelikož jsem v realizaci BP používal rozváděcí ventily, které jsou na didaktické nástavbě, bylo třeba zvolit ventil pro válec 1A1, který mi umožňuje pracovat s odfuky do atmosféry bez bezpečnostních prvků, které automaticky vypustí vzduch volně do atmosféry při zaslepení ofukovacích cest v základně ventilu. Proto jsem zvolil jediný dostupný ventil, který jsem měl k dispozici a to ventil typu VUVG (8.4.1). Pro ovládání druhého válce (2A1), jsem již použil klasický bistabilní ventil 5/2 (8.4.2).

5.4.1 Monostabilní pneumatický ventil 2x 3/2 ovládaný solenoidy (566454)

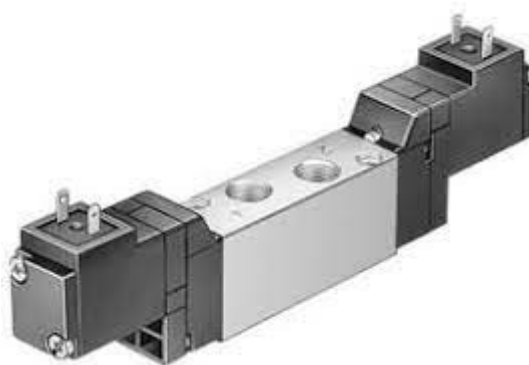
Ventil skládající se ze dvou 3/2 monostabilních ventilů jsem zvolil z důvodu, že to byl jediný ventil s didaktickou nástavbou, který jsem měl k dispozici a který mi umožnil vyměnit tlumiče hluku u odfuku do atmosféry za nástrčné šroubení a odebírat tak stlačený vzduch k rekuperaci. Nevýhodou tohoto ventilu je, že bylo třeba zajistit neustálý přívod proudu do jedné z cívek, aby se s pohonem nedalo samovolně hýbat a byl vždy v jedné koncové poloze. Ventil se totiž chová jako monostabilní ventil 5/3 v klidové poloze odvětráný. [16]



Obr. 36 -VUVG-L10-T32C-AT-M5-1P3 [Interní cloud FESTO]

5.4.2 Bistabilní pneumatický ventil 5/2 ovládaný solenoidy (173433)

Pro ovládání válce 2A1 jsem použil standardní bistabilní ventil 5/2 ovládaný solenoidy s didaktickou nástavbou. Jedná se o impulzní ventil s dvěma stabilními polohami, takže výhodou je, že stačí pouze impuls pro přestavení ventilu a dojetí válce do koncové polohy. [17]



Obr. 37 -JMEH-5/2-1/8-P-B [Interní cloud FESTO]

5.5 Výběr kompresoru pro testování

Pro testování spotřeby stlačeného vzduchu jsem zvolil kompresor s integrovaným vzdušníkem od firmy JUN-AIR. Jedná se o menší membránový kompresor s objemem vzduchu (při atmosférickém tlaku) 25 litrů. Kompresor jsem nastavil na horní mez přibližně 7,8 bar. Nechal jsem ho vždy dosáhnout horní meze, dokud se nevypnul a poté jsem ho manuálně vypnul od přívodu elektrické energie. Testování probíhalo, dokud pomocí tlakového spínače neklesl tlak na přívodu na hodnotu 4 bary. Tento kompresor jsem zvolil pro jeho menší objem, aby testování netrvalo příliš dlouho a zároveň bylo znatelné ušetření spotřeby vzduchu s rekuperačním systémem oproti testování bez rekuperačního systému. [18]



Obr. 38 -JUN-AIR 6-25

5.6 Výběr PLC

Z moderních řad PLC od firmy FESTO jsem měl na výběr ze tří modelových řad. Novější kompaktní PLC z řady CPX-E, starší kompaktní řada PLC terminálů CPX a modulární PLC řady CECC. Pro účely BP mi stačil modulární PLC řady CECC. V této řadě je na výběr celkem ze tří variant:

- CECC-D – nejjednodušší PLC, které umožňuje připojení pouze digitálních vstupů a výstupů
- CECC-LK – PLC, které kromě digitálních vstupů a výstupů disponuje rozhraním IO-Link
- CECC-S – PLC, které kromě digitálních vstupů a výstupů disponuje připojením sériové komunikace

Pro realizaci BP, jsem si tedy vybral CECC-LK, abych mohl zajistit komunikaci s IO-Link senzory tlaku a průtoku. Dalším kritériem pro výběr byla spolupráce s firmou FESTO a zkušenostmi s programovacím prostředím CoDeSys, proto jsem zvolil PLC CECC-LK.



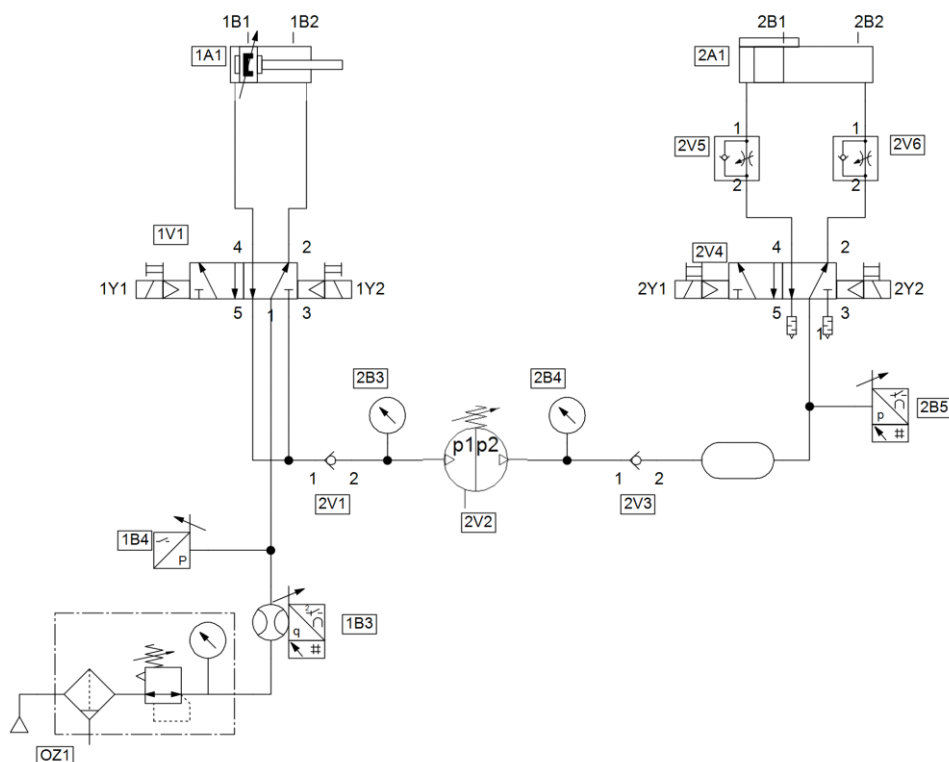
Obr. 39 -CECC-LK [Interní cloud FESTO]

Samotné realizaci zapojení předcházela návrh zapojení v programu FluidSim, který umožňuje navrhovat pneumatické i elektrické zapojení, včetně logického modulu simulující PLC. Návrh jsem provedl dle vybraných součástí. Obě schémata zapojení jsou nakreslena dle DIN normy pro kreslení elektropneumatických schémat. [7]

5.7 Návrh pneumatického zapojení

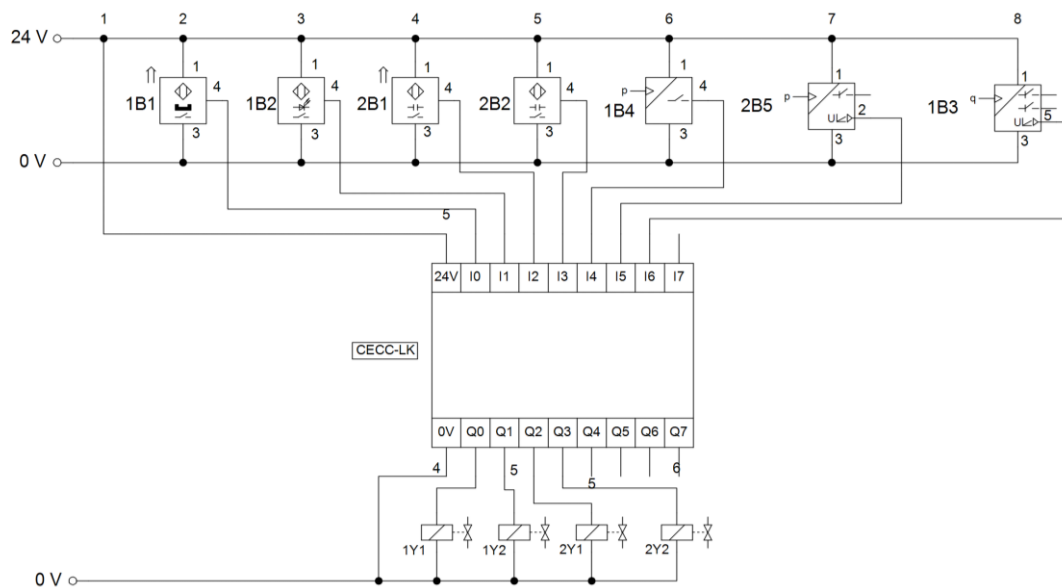
Prvním krokem návrhu zapojení bylo vytvoření pneumatického schématu a správného označení použitých komponent. Pro přehlednost jsem využil pro ovládání válce 1A1 elektropneumatický ventil 5/2, místo fyzicky zvoleného ventilu 2x 3/2. Na funkci fyzického zapojení to ovšem nemá vliv, protože lze použít i ventil 5/2 u kterého lze přizpůsobit odfuky do atmosféry (pneumatické připojení 5 a 3 ve schématu). Samotný program je napsán tak, aby fungoval jak pro zvolený ventil 2x 3/2 tak pro ventil ve schématu 5/2. Dále pneumatický zesilovač tlaku s označením 2V2 má už v sobě fyzicky integrované manometry pro kontrolu vstupního a výstupního tlaku. Ve FluidSimu bohužel schématická značka manometry neobsahuje, proto jsou dodány zvlášť včetně označení (2B3 a 2B4). Snímače koncových poloh jsou ve schématu přiřazeny jako montované přímo na válec, opět pro zachování přehlednosti, protože i kdyby byly přiřazeny přímo na pístnici, tak by na funkci neměly vliv, důležité je, že snímají koncové polohy. Snímač 1B4 je digitální tlakový snímač s displejem, který hlídá tlak na vstupu do

FESTO



5.8 Návrh elektrického zapojení

39



Obr. 41 -Elektrické zapojení

6 Realizace návrhu

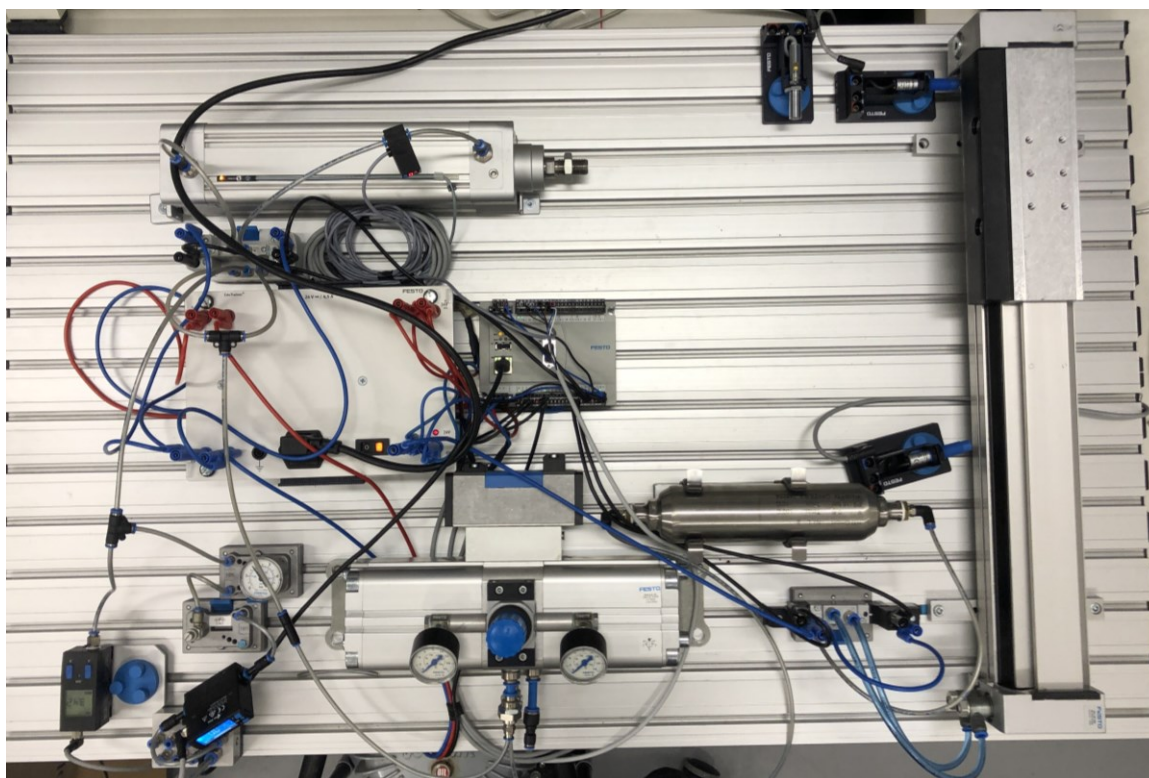
Dle navržených schémat zapojení pneumatické části jsem zapojil nejdříve systém s rekuperací a napsal program pro testování, poté jsem spustil samotné testování. Po provedení několika jednorázových testů a zjištění určité účinnosti systému jsem začal reálné testování se sběrem dat. Po dokončení testování systému s rekuperací jsem odpojil rekuperační systém a zahájil další testování. Jednotlivé druhy testování jsou popsány v kapitole č. 11 – Experimentální ověření.

6.1 Popis funkce návrhu

Systém simuluje lisovací stroj s odebráním lisovaného obrobku. Ve výchozí poloze jsou oba pneumatické pohony v zaseté poloze. Prvním krokem je vyjetí válce 1A1, který simuluje lisovací pneumatický válec. Po vyjetí válce 1A1, vyjede válec 2A1, který odebere lisovaný obrobek a předá ho k dalšímu zpracování. Po vyjetí válce 2A1, zajede zpět do výchozí polohy válec 1A1 a poté i válec 2A1. Jedná se o jednoduchou sekvenci pohybů pro účely testování rekuperačního zařízení.

6.2 Fyzické zapojení s rekuperací

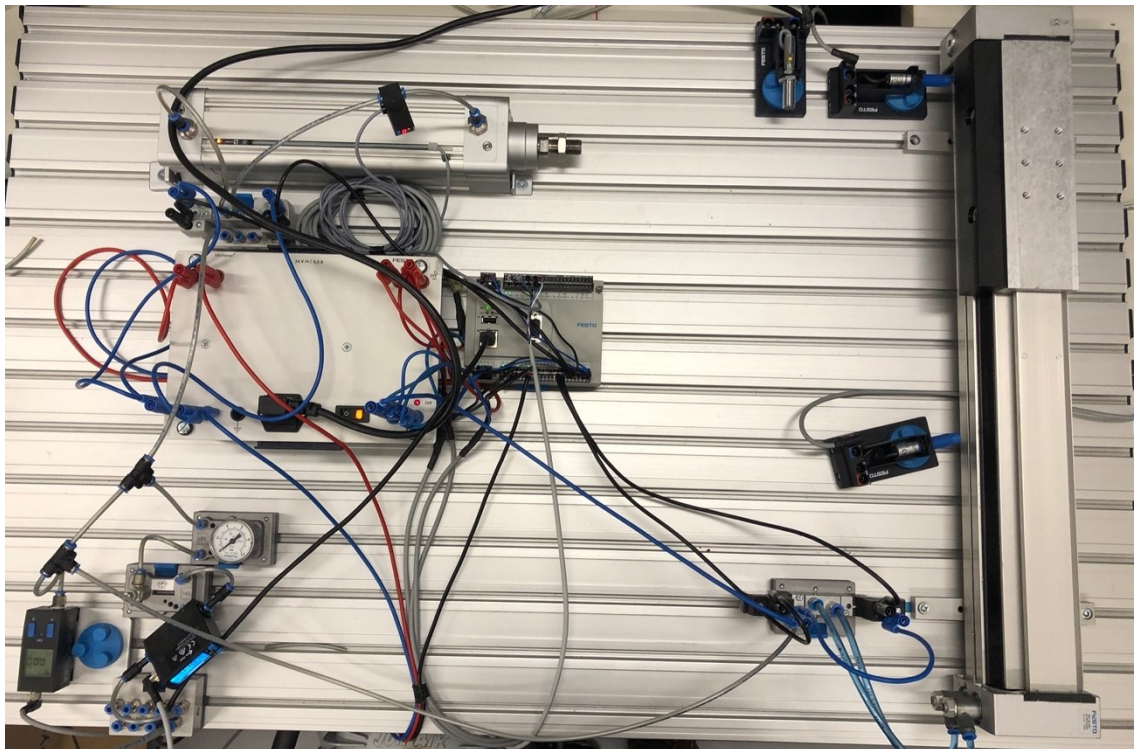
Dle výše uvedeného schématu jsem zapojil pneumatické zapojení systému s rekuperací. V horní části nalevo je umístěn válec 1A1, vpravo je poté bezpístnicový pneumatický válec 2A1. Na obrázku 42 je znázorněn výchozí stav testování (oba válce v zaseté poloze). Po zapojení pneumatické části jsem přešel na zapojení elektronické části. Prvním krokem bylo zajištění napájení všech snímačů, které nejsou napojeny přes IO-Link do PLC. V dalším kroku jsem zapojil signální vodiče do PLC a poté už jen následovaly snímače propojené skrze IO-Link do PLC.



Obr. 42 -Fotografie realizace zapojení s rekuperačním systémem

6.3 Zapojení bez rekuperace

Pro testování bez rekuperačního systému jsem upravil původní zapojení tak, že jsem odpojil tlakový zesilovač, vzdušník, zpětné ventily. Poté jsem u rozváděcího ventilu 1V1 uvolnil odvětrávací pneumatické připojení volně do atmosféry, jak bývá standardně konstruováno a přívod rozváděcího ventilu 2V4 jsem připojil na kompresor. Poté jsem spustil stejné testování jako v případě zapojení s rekuperací.



Obr. 43 - Fotografie realizace zapojení bez rekuperačního systému

6.4 Popis programu

Program pro řízení testování jsem vytvářel v programovacím prostředí CoDeSys V3.5 SP12 patch 6. Program je napsán tak aby řídil pohyb válců, kontroloval jejich koncové pozice, sbíral a zpracoval data ze senzorů připojených přes IO-Link, zobrazoval data pro pozdější využití v grafickém formátu. Pro usnadnění ovládání a přehlednost aktuálně snímaných dat jsem vytvořil i vizualizaci přímo v programovacím prostředí CoDeSys.

6.4.1 Deklarace proměnných

Deklarace proměnných je pro oba programy zvlášť. V hlavním programu deklaruji proměnné pro ovládání cívek ventilů na výstupu z PLC, pro sběr dat ze snímačů koncových poloh a digitálního tlakového snímače na vstupu do PLC. Dále pak deklarace v hlavním programu obsahuje pomocné proměnné pro testování.

Tab. 1 – Tabulka proměnných použitých v hlavním programu PLC

Název	Datový typ	Adresa	Komentář
press_on	BOOL	%QX0.4	Vyjetí lisovacího válce
press_off	BOOL	%QX0.5	Zajetí lisovacího válce
feeder_on	BOOL	%QX0.2	Vyjetí podávacího válce
feeder_off	BOOL	%QX0.1	Zajetí podávacího válce
press_1b1	BOOL	%IX0.0	Lisovací válec zajetý (výchozí poloha)
press_1b2	BOOL	%IX0.2	Lisovací válec vyjetý
feeder_2b1	BOOL	%IX0.4	Podavač zajetý
feeder_2b2	BOOL	%IX0.6	Podavač vyjetý
pressure_stop	BOOL	%IX0.7	Digitální tlakový snímač
hugo	INT	-	Pomocná proměnná CASE struktury
start	BOOL	-	Startovací tlačítko
counter1	CTU	-	Čítač hotových cyklů
reset	BOOL	-	Resetovací tlačítko
stop	BOOL	-	Nouzové zastavení

Deklarace proměnných pro program zpracování dat ze senzorů obsahuje dvě proměnné, které jsou deklarovány na fyzické adresy, což jsou senzory propojené s PLC přes IO-Link. Dále jsou deklarované proměnné pro přepočty a sběr dat z těchto senzorů.

Tab. 2 - Tabulka proměnných použitých ve vedlejším programu PLC pro zpracování dat ze senzorů

Název	Datový typ	Adresa	Komentář
pressure	UINT	%IW1	Výstup z tlakového snímače
flow_sensor	UINT	%IW3	Výstup z průtokoměru
pressure_bar	REAL	-	Výsledný tlak v bar
actual_flow	REAL	-	Aktuální průtok v l/min
flow_help	REAL	-	Pomocná proměnná pro výpočet celkového průtoku
litres	REAL	-	Přepočet l/min na celkové litry
total_flow	REAL	-	Spotřeba vzduchu v litrech celkově

6.4.2 Hlavní program (řídící)

Hlavní část programu slouží k řízení pohybu válců na základě získávaných informací o poloze jednotlivých pohonů. Dále je v programu ošetřeno počítání celkového počtu cyklu testování, kdy jeden cyklus je brán jako vyjetí a zjetí obou válců v daném pořadí, po uskutečnění předem nastaveného počtu cyklů program přejde do kroku, kdy nechá zjet oba válce a čeká na další příkazy. V případě neočekávané chyby je v programu i nouzová funkce stop, která nechá zjet oba válce opět do výchozí polohy a zastaví celý proces, včetně deaktivace spouštěcího tlačítka "Start". Dále je v programu implantováno automatické zastavení po dokončení cyklu v případě, kdy na vstupu do systému je tlak roven hodnotě 4 bary, nebo nižší.

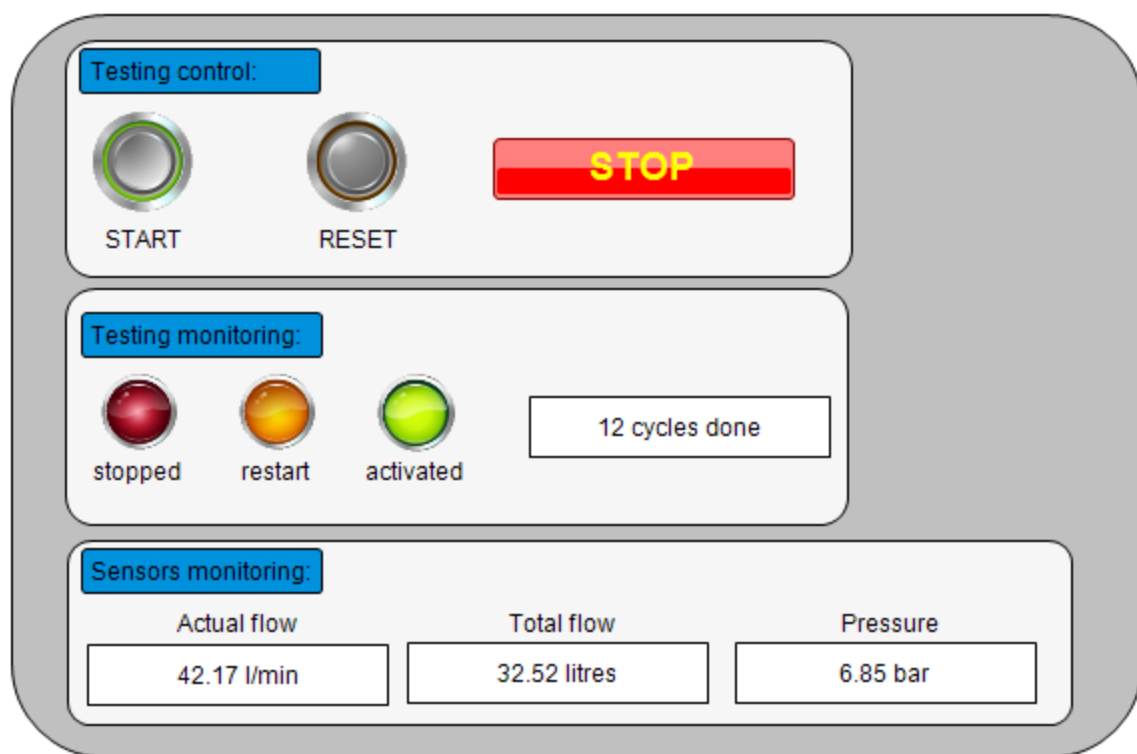
Hlavní program se skládá z několika prioritních podmínek, které jsou realizované pomocí funkce "IF" a po těchto podmínkách následuje sekvence kroků, které řídí pohyby válců. Tyto kroky jsou realizované pomocí struktury "CASE".

6.4.3 Program pro zpracování dat ze senzorů

Tento vedlejší program slouží k zpracování dat získaných ze senzorů připojených skrze IO-Link k PLC. Hodnota v UINT se přepočítává do hodnoty tlaku v bar a u průtoku v litrech za minutu. Zatímco hodnota tlaku už zůstává v barech, protože jiná hodnota není třeba pro testování, průtok ještě přepočítávám z aktuální hodnoty na celkovou hodnotu v litrech za celé testování. Přepočet je zpracován tak, že aktuální hodnotu v litrech za minutu přepočítávám na hodnotu v litrech za 1 ms, jelikož je "cycle task time" procesoru 1 ms. A tuto hodnotu poté přičítám k pomocné proměnné.

6.5 Vizualizace

Pro jednodušší ovládání, přehlednost a monitorování celého testování jsem vytvořil jednoduchou vizualizaci, která umožňuje skrze tlačítka ovládat průběh testu, monitorovat v jakém stavu se test nachází, kolik cyklů je již hotových a sledování důležitých parametrů testování v reálném čase.



Obr. 44 -Vizualizace z programu pro testování

7 Experimentální ověření

Experimentální ověření jsem rozdělil do několika částí. První částí bylo ověření účinnosti systému na jeden cyklus. Z tohoto testu jsem nasbíral nejzajímavější data, která umožnila i dopočet sil jednotlivých válců. Pro úplnost testu jsem použil i závaží na druhém válci.

Dalším krokem ověření bylo testování s 25 litrovým kompresorem, u kterého je vidět účinnost rekuperačního systému na vykonaných cyklech, než hodnota tlaku v kompresoru klesla pod 4 bary. Tento test probíhal již bez zátěže na druhém válci.

Poslední částí experimentálního ověření bylo testování účinnosti systému v případě napojení na reálný firemní rozvod stlačeného vzduchu z centrálního kompresoru. Tato část testování obsahovala celkem 20 cyklů na jeden test a měření probíhalo celkem třikrát pro systém s rekuperací i bez rekuperace.

7.1 Naměřené a dopočtené hodnoty na jeden cyklus

První část testování probíhala tak, že jsem připojil systém k výše uvedenému 25 litrovému kompresoru a provedl vždy jeden test, což byl pouze jeden pracovní cyklus systému, pro zapojení s rekuperací a bez rekuperace bez zátěže a poté se zátěží na druhém válci. Zátěž válce byla simulována upevněním 10 kg závaží na saně pohonu. Tlak na vstupu do systému byl celou dobu udržován úpravnou jednotkou na hodnotě přibližně 6 bar.

Prvně jsem testoval se snímáním tlaku na vstupu do ventilu pro ovládání druhého válce (v Tab. 3 – Tlak na 2 válci), kde jsem zjišťoval rozdíl mezi vstupním tlakem, a tudíž i účinností druhého válce se zapojením rekuperace, oproti standardnímu stavu. Z tohoto testování jsem poté zjistil sílu druhého válce bez i s rekuperací.

Při dalším testu jsem tlakový snímač 2B5 přesunul na pneumatické připojení na válec 1A1 pro zpětný pohyb, čímž jsem získal hodnotu tlaku, který tvořil odpor proti pístu válce při dopředném pohybu. Tuto protisílu jsem využil ve výpočtu síly prvního válce.

Posledním testováním bylo změření času celého cyklu a spotřeby stlačeného vzduchu za jeden cyklus celého systému v litrech.

Tab. 3 – Naměřené a dopočítané hodnoty z první části testování z jednoho cyklu

	Bez zátěže		Se zátěží na válci 2A1 (10 kg)	
	S rekuperací	Bez rekuperace	S rekuperací	Bez rekuperace
Čas na cyklus (s)	9,56	6,99	10,02	7,21
Spotřeba na cyklus (l)	8,3639	13,9934	8,3639	14,008
tlak na 2. válci (bar)	1,85	6,08	2,17	6,08
tlak proti 1. válci (bar)	2,36	1,23	2,81	1,26
síla 1. válce (N)	1233	1551	1107	1542
síla 2. válce (N)	232	764	273	764

7.2 Příklady výpočtů síly

Vzorec pro výpočet síly pro dopředný pohyb bez protitlaku na pístnici

$$F = \frac{p \cdot \pi \cdot d^2}{4}$$

F – síla (N)

p – tlak na vstupu do válce (Pa)

d – průměr pístu (m)

[19]

Vzorec pro výpočet síly pro zpětný pohyb válce s pístnicí

$$F = \frac{p \cdot \pi \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{4}$$

F – síla (N)

p – tlak na vstupu do válce (Pa)

d₁ – průměr pístu (m)

d₂ – průměr pístnice (m)

[19]

Výpočet síly pro válec 1A1 v dopředném pohybu

$$F_1 = \frac{p \cdot \pi \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{4} = \frac{123 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot [(63 \cdot 10^{-3})^2 - (20 \cdot 10^{-3})^2]}{4} = 344,7795 \text{ N}$$
$$F_2 = \frac{p \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{608 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot (63 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1895,2851 \text{ N}$$
$$F = F_2 - F_1 = \mathbf{1550,5056 \text{ N}}$$

Výpočet síly pro válec 2A1 v dopředném pohybu

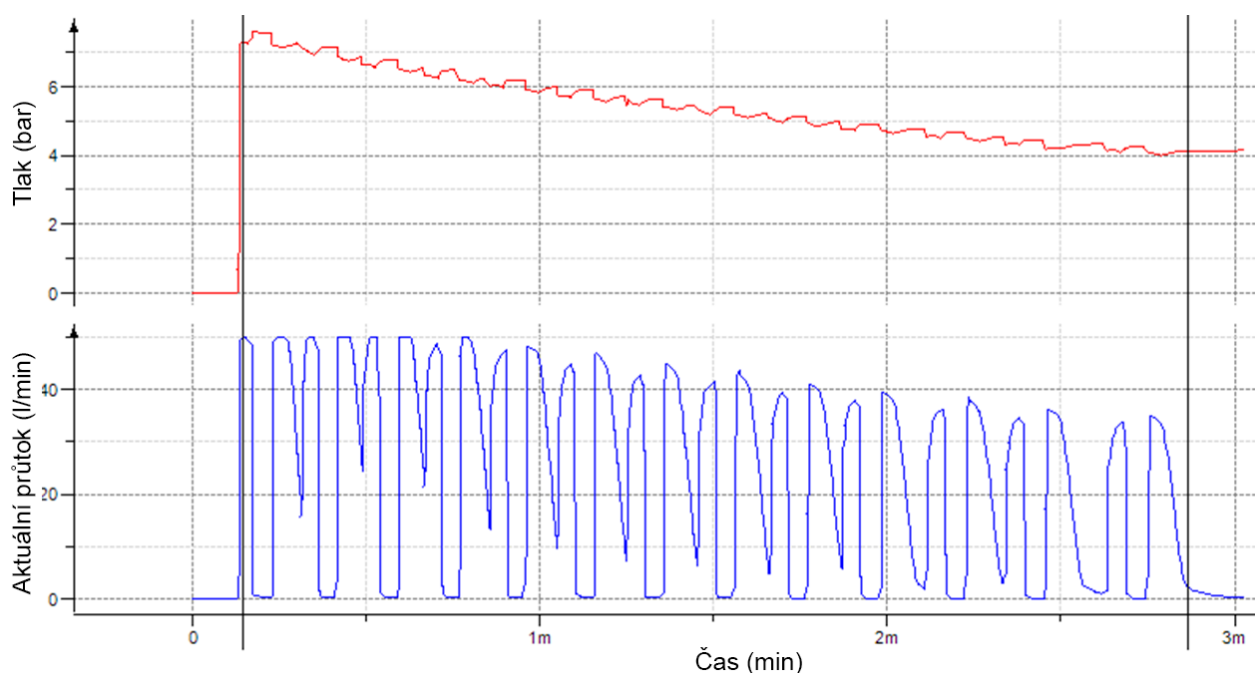
$$F = \frac{p \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{608 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot (40 \cdot 10^{-3})^2}{4} = \mathbf{764,0353 \text{ N}}$$

7.3 Testování s 25 l kompresorem

Stejně jako v bodě 10.1 byl systém připojen na kompresor s objemem vzdušníku 25 litrů. Kompresor byl před začátkem testování natlakován na 7,8 bar. Poté jsem vypnul jeho automatické spuštění při poklesu tlaku pod dolní mez a spustil testování nejdříve s rekuperací. Po testování s rekuperací jsem nechal kompresor znovu natlakovat na 7,8 bar a spustil test bez rekuperace. Testování se vždy automaticky zastavilo, když hodnota tlaku na kompresoru, respektive na vstupu do celého systému, klesla pod 4 bary.

7.3.1 S rekuperací

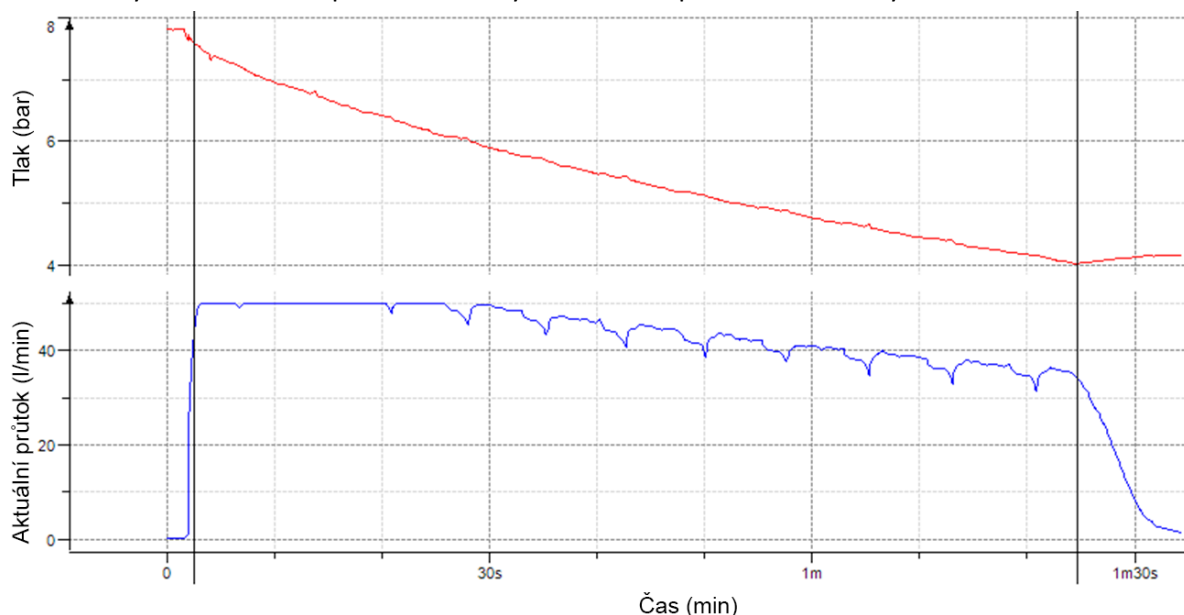
Při testu s rekuperací lze vidět skokovou spotřebu stlačeného vzduchu v litrech za minutu, což značí zapojení rekuperačního systému a téměř nulovou spotřebu při dopředném pohybu válce 2A1. Dále je vidět malé rozšíření průběhu spotřeby stlačeného vzduchu při klesání tlaku. Z průběhu lze vyčíst, že testování trvalo přibližně 2 minuty a 50 sekund a za tento časový úsek systém vykonal celkem 16 cyklů než klesl tlak v kompresoru pod 4 bar.



Obr. 45 - Průběh tlaku a aktuálního průtoku při testování s 25 l kompresorem a použitím rekuperace

7.3.2 Bez rekuperace

U testování bez rekuperace lze vidět mnohem rychlejší pokles tlaku v systému a neskokový průběh aktuálního průtoku stlačeného vzduchu. Oproti testu s rekuperací lze vidět, že spotřeba vzduchu je stále nenulová, jelikož kompresor napájí stlačeným vzduchem i druhý válec. Z průběhu můžeme opět vyčíslit dobu testu, která činí přibližně 1 minutu a 24 sekund. A za tento časový úsek systém vykonal celkem 11 cyklů. Testování opět skončilo když tlak na vstupu dosáhl hodnoty 4 bar.



Obr. 46 - Průběh tlaku a aktuálního průtoku při testování s 25 l kompresorem, bez rekuperace

7.4 Testování s 20 cykly

Pro otestování rekuperačního systému v reálnějších podmínkách z praxe jsem připojil celý systém na centrální firemní rozvod stlačeného vzduchu z centrálního kompresoru. Na úpravné jednotce jsem nastavil na vstup do systému přibližně 6 bar. Nejdříve probíhalo testování s rekuperačním systémem a tlakovým snímačem snímajícím tlak na pneumatickém šroubení pro zpětný pohyb válce 1A1, poté jsem snímač přesunul na vstup do ventilu, který ovládá pneumatický válec 2A1. Poté jsem odpojil rekuperační systém a obě testování znovu zopakoval.

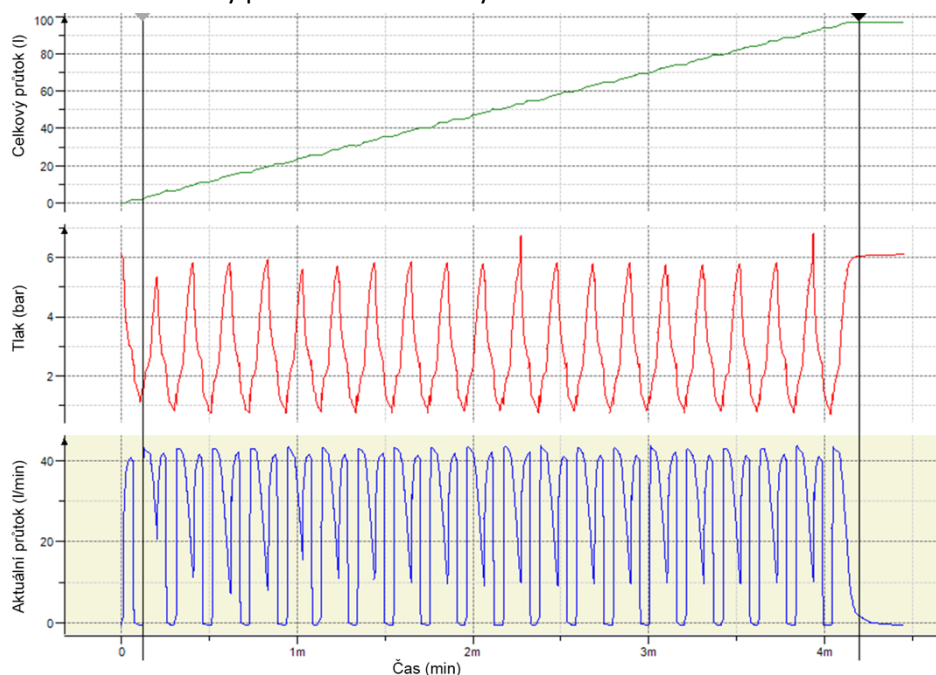
Při testování systému připojenému k centrálnímu rozvodu stlačeného vzduchu jsem chtěl zjistit prioritně celkovou spotřebu systému na 20 cyklů v simulovaných reálných podmínkách dodávání stálého tlaku a časové náročnosti systému s rekuperací a bez.

7.4.1 S rekuperací

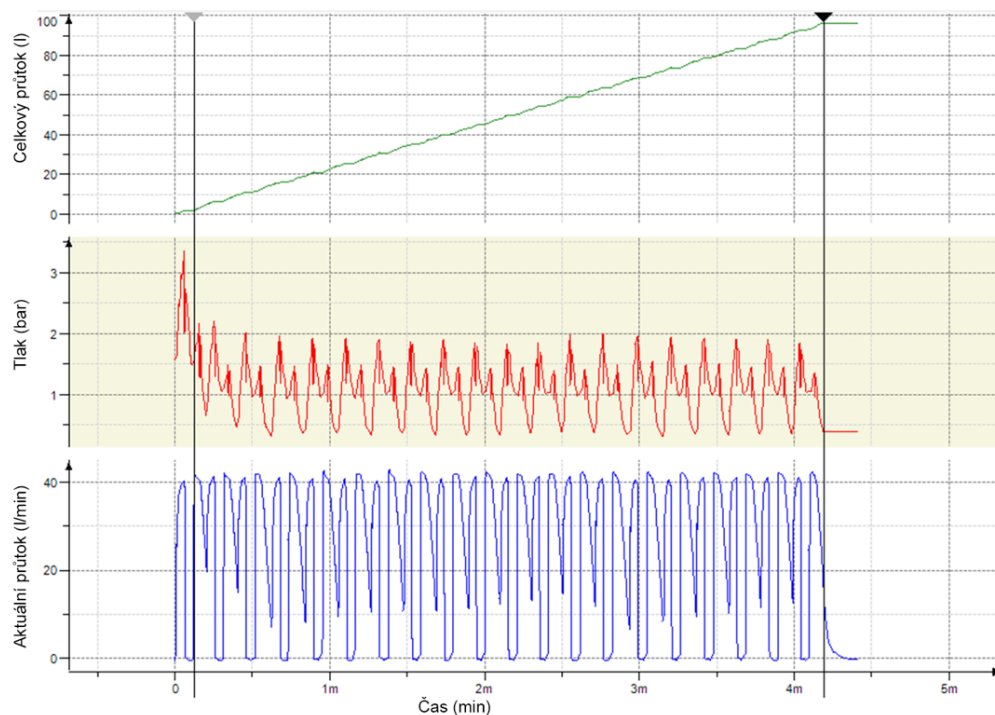
Při prvním testování byl, jak už bylo zmíněno výše, tlakový snímač umístěn na pneumatickém připojení na válci 1A1 pro zpětný pohyb. Cílem této pozice měření bylo zjištění hodnoty tlaku působící proti pístu válce 1A1 při dopředném pohybu, a tudíž i síle, která snižuje účinnost tohoto válce.

Druhým místem měření tlaku byl vstup do ventilu 2V4, který rozvádí vzduch do válce 2A1. Cílem této pozice měření bylo zjistit hodnotu tlaku, kterou dodá rekuperační systém na pohyb dopředný i zpětný válce 2A1.

Z průběhu obou testování s rekuperací můžeme vyčíst, že na 20 cyklů systém spotřebuje přibližně 95 litrů vzduchu a celý proces trvá 4 minuty a 20 sekund.



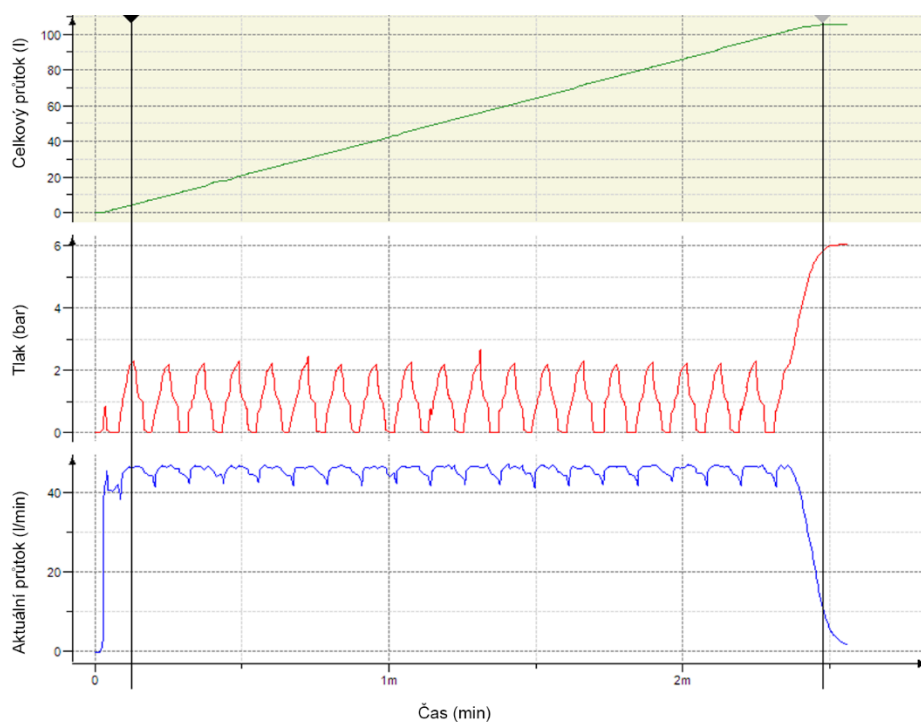
Obr. 47 - Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a použitím rekuperace, umístění 2B5 na pneumatickém připojení válce 1A1 pro zpětný pohyb



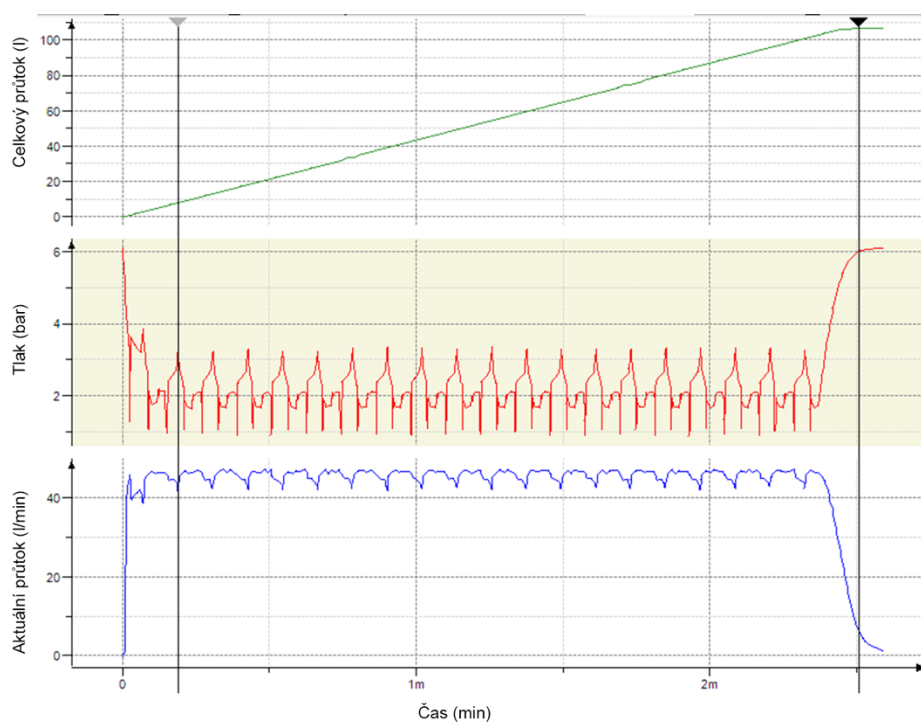
Obr. 48 -Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a použitím rekuperace, umístění 2B5 na vstupu ventilu 2V4

7.4.2 Bez rekuperace

U testování bez rekuperace můžeme vidět, že celková spotřeba je o 10 litrů na 20 cyklů vyšší než v případě použití rekuperace. Také doba testování je nižší, jelikož testování trvalo přibližně jen 2 minut a 30 sekund. Co se týká měření tlaku působícím proti dopřednému pohybu válce 1A1, tak je v případě testování systému bez rekuperace nižší ve špičce průběhu než při použití rekuperace, takže válec je v tomto případě účinnější. V případě měření tlaku na ventilu 2V4 už je patrné, že i zde je válec 2A1 účinnější než u použití rekuperace, jelikož v systému bez rekuperace je tlak na vstupu do ventilu ve špičce průběhu na hodnotě 3 bar.



Obr. 49 - Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a bez použití rekuperace, umístění 2B5 na pneumatickém připojení válce 1A1 pro zpětný pohyb



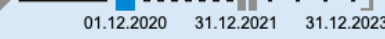

Obr. 50 - Průběh celkového průtoku, tlaku a aktuálního průtoku při testování na 20 cyklů a bez použití rekuperace, umístění 2B5 na vstupu ventilu 2V4

8 Ekonomická účinnost zapojení



Posledním krokem celého testování je zjištění ekonomické stránky celého systému. Veškeré ceny udávané v BP k součástkám firmy FESTO jsou platné pro IdeaHub, z. s. ke dni 27.4.2021 a cena stlačeného vzduchu je pouze orientační.

8.1 Cena zapojení bez rekuperačního systému

Cena na níže uvedených fotkách je zavádějící, jelikož firma FESTO umožňuje nákup přibližovacích čidel SMT-8M v minimálním množství 10ks. Dále na obr. 52 jsou ještě přiložené didaktické senzory, které nejsou standardně pro automatizaci dostupné a snímač SEN-BG-SKE je použit v zapojení celkem 2x. Celková cena systému bez hadic, kompresoru a pneumatických šroubení činí 68 124,77 Kč.

<input type="checkbox"/>	Poz.	číslo dílu Festo	množství	vaše číslo dílu	typ a název	vaše cena	celkem CZK	datum dodání	
<input type="checkbox"/>	10	532449	1	KS	DGC-40-340 přímochařý pohon DGC-40-340-GF-PPV-A- EX2	21.193,26	21.193,26	17.05.2021	
<input type="checkbox"/>	20	574418	1	KS	CECC-LK řízení	16.822,30	16.822,30	17.05.2021	
Pozort: výběrový výrobek, jako sériový lze dodat v průběhu roku 2023. Nepoužívat pro nové konstrukce. Alternativy po dohodě.									
<input type="checkbox"/>	30	173433	1	KS	JMEH-5/2-1/8-P-B elmag. ventil	5.794,90	5.794,90	17.05.2021	
Výběrový výrobek 									
						Náhradní výrobek  → elektromagnetický ventil VUVG (564212) interchangeable by function Identical function, but can not be interchanged 1 to 1			
<input type="checkbox"/>	40	1383585	1	KS	DSBC-63-200-PPVA- N3 válec dle norem	5.044,36	5.044,36	17.05.2021	
<input type="checkbox"/>	50	566454	1	KS	VUVG-L10-T32C-AT- M5-1P3 elmag. ventil	2.111,44	2.111,44	17.05.2021	
<input type="checkbox"/>	60	193155	2	KS	GRLZ-M5-QS-6-D jednosm.škrt.v.	404,06	808,12	17.05.2021	
<input type="checkbox"/>	70	573919	2	KS	VAVE-L1-1VR8-LP el.přip.deska	346,14	692,28	17.05.2021	
<input type="checkbox"/>	80	574333	10	KS	SMT-8M-A přibl. čidlo SMT-8M-A-PS-24V-E-2-M8	870,83	8.708,30	17.05.2021	
celkem							61.174,96	CZK	

Obr. 51 -Náhled košíku za komponenty pro průmyslovou automatizaci – zapojení bez rekuperace

Označení		Číslo zboží	Jednotková cena CZK	Množství	Celková cena CZK
<p>přibl. čidlo</p> 	<p>Pozice 10 D:SEN-BG-SKE-M12-PS-K</p> <p>Obvyklá dodací lhůta: 3 - 4 týdny</p>	548651	4.983,89	1	4.983,89
<p>přibl. čidlo D:SEN-BG-SOEG-RT-M12-PS&</p> 	<p>Pozice 20 D:SEN-BG-SOEG-RT-M12-PS-B4</p> <p>Obvyklá dodací lhůta: 3 - 4 týdny</p>	572744	4.819,58	1	4.819,58

Obr. 52 - Cenová nabídka FESTO Didactic na didaktické snímače použité v obou zapojení

8.2 Cena zapojení s rekuperačním systémem

Cena na níže uvedených fotkách je zavádějící, jelikož firma FESTO umožňuje nákup přibližovacích čidel SMT-8M v minimálním množství 10ks. Dále na obr. 52 jsou ještě přiložené didaktické senzory, které nejsou standardně pro automatizaci dostupné. Celková cena systému bez hadic, kompresoru a pneumatických šroubení činí 102 071,31 Kč, což znamená, že systém s rekuperací je dražší o 33 946,54 Kč.

<input type="checkbox"/>	Poz.	číslo dílu Festo	množství	vaše číslo dílu	typ a název	vaše cena	celkem CZK	datum dodání		
<input type="checkbox"/>	10	532449	1	KS	DGC-40-340 přímotahový pohon DGC-40-340-GF-PPV-A- EX2	21.193,26	21.193,26	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	20	574418	1	KS	CECC-LK řízení	16.822,30	16.822,30	27.05.2021		
Pozor: výběrový výrobek, jako sériový lze dodat v průběhu roku 2023. Nepoužívat pro nové konstrukce. Alternativy po dohodě.										
<input type="checkbox"/>	30	173433	1	KS	JMEH-5/2-1/8-P-B elmag. ventil	5.794,90	5.794,90	27.05.2021		
<div> <div>Výběrový výrobek</div> <div> <div>01.12.2020</div> <div>31.12.2021</div> <div>31.12.2023</div> </div> </div> <div> Náhradní výrobek → elektromagnetický ventil VUVG (564212) interchangeable by function Identical function, but can not be interchanged 1 to 1 </div>										
<input type="checkbox"/>	40	1383585	1	KS	DSBC-63-200-PPVA- N3 válec dle norem	5.044,36	5.044,36	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	50	566454	1	KS	VUVG-L10-T32C-AT- M5-1P3 elmag. ventil	2.111,44	2.111,44	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	60	193155	2	KS	GRLZ-M5-QS-6-D jednosm.šrtl.v.	404,06	808,12	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	70	573919	2	KS	VAVE-L1-1VR8-LP el.přip.deska	346,14	692,28	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	80	574333	10	KS	SMT-8M-A přibí. čidlo SMT-8M-A-PS-24V-E-2-M8	870,83	8.708,30	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	90	160234	1	KS	CRVZS-0.4 zás. stl. vzd.	2.254,35	2.254,35	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	100	184518	1	KS	DPA-63-10 zesilovač tlaku	30.629,09	30.629,09	27.05.2021		
<input type="checkbox"/>	110	153462	2	KS	H-QS-4 zpětný ventil	531,55	1.063,10	27.05.2021		
celkem							95.121,50 CZK			

Obr. 53 -Náhled košíku za komponenty pro průmyslovou automatizaci – zapojení s rekuperací

8.3 Spotřeba vzduchu

Přibližná cena stlačeného vzduchu se pohybuje na hodnotě 10 Kč za m³. Na Obr. 54 můžeme vidět, že oba válce v podmínkách testování (8 cyklů za minutu) spotřebují za minutu 115 litrů stlačeného vzduchu. V případě, že tento systém bude v provozu 16 hodin denně, tak provoz těchto dvou válců stojí denně 1142,27 Kč. Na Obr. 55 můžeme ale vidět, že pokud se sníží celková spotřeba o 10 litrů jako v případě testování s 20 cykly, denně tak lze ušetřit 103,65 Kč. To by znamenalo, že pořizovací cena rekuperačního systému by se navrátila po přibližně 327 dnech, pokud by rekuperační systém zvládl za stejný časový úsek udělat stejný počet cyklů, jako systém bez rekuperace.

Na Obr. 56 je vyobrazen případ, kdy oba válce fungují bez rekuperačního systému, ale vykonávají stejný počet cyklů jako systém rekuperační (5 cyklů za minutu). V tomto případě je spotřeba vzduchu za minutu celkem 74 litrů, což je mnohem nižší hodnota než v případě použití rekuperace při 8 cyklech za minutu.

spotřeba vzduchu ⓘ

za minutu

119 l

za den

114226 l

ročně

22845300 l

náklady na energii ⓘ

cena

10

CZK

/m³

↗ za den

1142.27^{CZK}

šetřit energii ⓘ

vytížení

pracovní tlak

6

bar

počet hodin provozu denně

16

h

počet pracovních dnů za rok

200

d

Obr. 54 -Obrázek z engineering tool – teoretická spotřeba vzduchu pro oba válce na 8 cyklů za minutu bez rekuperace [20]

spotřeba vzduchu ⓘ

za minutu

108 l

za den

103862 l

ročně

2

náklady na energii ⓘ

cena

10

CZK

/m³

↗ za den

1038.62^{CZK}

uspořeno ⓘ

103.65^{CZK}

Obr. 55 -Obrázek z engineering tool – teoretická spotřeba vzduchu pro oba válce na 8 cyklů za minutu s rekuperací [20]

spotřeba vzduchu ⓘ

za minutu

74 l

za den

71392 l

ročně

14278312 l

náklady na energii ⓘ

šetřit energii ⓘ

cena

10 CZK /m³

↗ za den

713.92 CZK

vytížení

pracovní tlak

6 bar

počet hodin provozu denně

16 h

počet pracovních dnů za rok

200 d

Obr. 56 - Obrázek z engineering tool – teoretická spotřeba vzduchu pro oba válce na 5 cyklů za minutu bez rekuperací [20]

8.4 Účinnost válců

Z tabulky č. 3 můžeme vyčíst, že první válec má bez rekuperace standardní sílu 1551 N a druhý válec 764 N. V případě využití rekuperačního systému mají válce svou sílu nižší. U prvního válce je to 1233 N a u druhého válce je síla s rekuperací 232 N. To znamená, že síla prvního válce s rekuperací je 79,5% oproti standardnímu zapojení. V případě druhého válce je síla s rekuperací pouze 30,4%.

9 Závěr

Cílem této bakalářské práce ve spolupráci s firmou Festo, bylo se seznámit se se stlačeným vzduchem jako pracovním médiem, dále problematikou pneumatických a elektropneumatických systémů řízených modulárním programovatelným automatem a na základě zjištěných informací a předem získaných znalostí z praxe navrhnout a sestavit rekuperační systém, který by dokázal snížit náklady na výrobu stlačeného vzduchu, jelikož stlačený vzduch jako pracovní médium nejdražším médiem. Základní informace o stlačeném vzduchu jsou popsány v teoretické části BP, stejně jako problematika jednotlivých pneumatických a elektropneumatických komponent.

Ohledně experimentálního ověření bakalářské práce, tak největším problémem bylo vybrat komponenty, z již dostupných, pro realizaci rekuperačního systému, poté vybrat správné válce. Nakonec stačilo najít vhodný rozváděcí ventil s didaktickou nástavbou, který jsem měl k dispozici a mohl bych ho upravit pro odběr stlačeného vzduchu z válce 1A1. Kromě těchto zmíněných komplikací již zbývající kroky realizace nebyly problémem, díky mým zkušenostem z tříleté spolupráce s Festo, přesněji s oddělením Didactic, kde jsem se setkal nejen s pneumatickými a elektropneumatickými systémy, ale i s jejich PLC, elektrickými pohony a hydraulickými systémy.

Rekuperační systém vytvořený a testovaný v této bakalářské práci se ve výsledku ukázal jako neekonomický. Z hlediska spotřeby a ceny stlačeného vzduchu by se vyplatilo rekuperační systém použít, kdyby pneumatické pohony neztrácely na své rychlosti. Poté, jak bylo výše zmíněno, by byla návratnost systému po roce provozu. V tomto případě by pak hrálo roli i opotřebení součástek tvořící rekuperační systém. Dalším faktorem rekuperačního systému je snížení síly válců, což by znamenalo zvýšené požadavky na sílu válců v případě koupě. Tyto válce by měli vyšší pořizovací cenu, vyšší spotřebu stlačeného vzduchu a jiné požadavky na úpravu rekuperačního systému. Další nevýhodou rekuperačního systému je i zvýšená hlučnost, jelikož tlakový zesilovač při svém provozu odpouští malé procento vzduchu do atmosféry.

Dalším postupem na téma této bakalářské práce by mohlo být zaměření se na problematiku snižování rychlosti a síly pneumatických válců. Kdyby se vyřešila tato problematika, rekuperační systém by měl poté možná využití. Dalším faktorem, který by bylo třeba vyřešit a otestovat, je výdrž tlakového zesilovače v dlouhodobém rozsahu. Rekuperační systém je sestaven tak, aby tlakový zesilovač nebyl v neustálém provozu, ke kterému není ani konstruován.

Správně navržený a plně funkční rekuperační systém by ovšem na trhu mohl mít velké využití a to především u velkých pneumatických systémů, kde je spotřeba stlačeného vzduchu nejdražší. Otázkou ovšem je, zda má cenu se v dnešní době ještě rekuperační stlačeného vzduchu zabývat, když pneumatické pohony začínají být postupně nahrazovány elektrickými pohony pro úlohy vyžadující menší zdvih a sílu. Pneumatické pohony ale stále nabízí určité výhody, ke kterým patří rychlost, síla, bezpečnost, čistota.

10 Literatura

- [1] Frank EBEL, Siegfried IDLER, Georg PREDE, Dieter SCHOLZ a Dorje SCHWARZENBERGER. ©FESTO DIDACTIC GMBH & CO. KG. Pneumatika Elektropneumatika: Základy [PDF soubor]. 5.11.2010. 73770 Denkendorf, Germany: © Festo Didactic GmbH & Co., 2010, 212 s. Obj. č.: 573030.
- [2] © FESTO DIDACTIC GMBH & CO. PN111: Úvod do pneumatiky. Festo, s.r.o. , Modřanská 543/76, 147 00 Praha 4, 238 s.
- [3] Ing. VOTRUBEC Pavel. © FESTO DIDACTIC GMBH & CO. PN281-2: Elektropneumatické řídicí systémy. Verze 2020. Ed. B. Przeczek a T. Veselský. Festo, s.r.o. , Modřanská 543/76, 147 00 Praha 4, 2020, 191 s.
- [4] [FESTO. Zesilovače tlaku DPA [online]. 2015/06. 25 s. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/DPA_CZ.PDF
- [5] Ing. Filip KINOVIČ, Ing. Rostislav KÁŇA a doc. Ing. Karel KADLEC, CSc. Tepelné hmotnostní průtokoměry a regulátory. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku [online]. 2003, 12/2003n. I. [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/tepelne-hmotnostni-prutokomery-a-regulatory-2003_12_29006_599/
- [6] © FESTO DIDACTIC GMBH & CO. CoDeSys: PLC CECC. Verze 2019. Ed. B. Przeczek a T. Veselský. Festo, s.r.o. , Modřanská 543/76, 147 00 Praha 4, 2020, 11 s.
- [7] FESTO. Řídicí systémy CECC [online]. 2017/05. 10 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/CECC_CZ.PDF
- [8] IO - Link: What is IO - Link [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://io-link.com/en/Technology/what_is_IO-Link.php?thisID=73
- [9] FESTO. Válce dle norem DSBC: ISO 15552 [online]. 2020/09. 29 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/DSBC_CZ.PDF
- [10] FESTO. Přímochař pohony DGC. 2020/09. 76 s. Dokumentace. Dostupné také z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/DGC_CZ.PDF
- [11] FESTO. Přibližovací čidla SMT/SME-8: do drážky T [online]. 2018/03. 71 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/SMX8_CZ.PDF
- [12] FESTO. Čidla tlaku SPAE [online]. 2018/03. 10 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/SPAE_CZ.PDF
- [13] FESTO. Průtokoměry SFAH [online]. 2018/03. 15 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/SFAH_CZ.PDF
- [14] FESTO. Zásobníky na stlačený vzduch [online]. 2006/10. 6 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/AIR-RESERVOIRS_CZ.PDF. Výrobky 2007.
- [15] FESTO. Check valves: H/HA/HB [online]. 2020/10. 7 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_ENGB/PDF/EN/H-HA-HB_EN.PDF
- [16] FESTO. Elektromagnetické ventily VUVG/ventilové terminály VTUG [online]. 2017/02. 201 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/VTUG-G_CZ.PDF

- [17] FESTO. Elektromagneticky/pneumaticky ovládané ventily: Midi [online]. 2005/07. 43 s. [cit. 2021-4-29]. Dokumentace. Dostupné z:
https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_CS/PDF/CZ/MIDI-PNEUMATIC_CZ.PDF.
Výrobky 2006/2007.
- [18] JUN-AIR. 6-25. JUN-AIR [online]. 2021. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: http://www.jun-air.com/product_detail.aspx?ProductID=633&ProductTypeID=50
- [19] Pneumatic Cylinders: Force Exerted. Engineering ToolBox [online]. 2008 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/pneumatic-cylinder-force-d_1273.html
- [20] Cylinder Air Consumption. FESTO. Cylinder Air Consumption: engineering tool [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: https://www.festo.com/eap/cs_cz/AirConsumption/

Seznam příloh

Program včetně vizualizace:

Přílohy/BP_recuperation_v3.zip/BP_recuperation_v3.project

Oficiální zadání Festo:

Přílohy/BP zadání FESTO.pdf

Soubory:

Přílohy/Kompresor1.jpg – štítek na kompresoru JUN-AIR

Přílohy/Kompresor2.jpg – fotografie kompresoru JUN-AIR

Přílohy/p_druhy_RKP.png – graf z testování, měření tlaku na vstupu do ventilu 2V4, s rekuperací

Přílohy/p_druhy.png – graf z testování, měření tlaku na vstupu do ventilu 2V4, bez rekuperace

Přílohy/p_prvni_RKP.png – graf z testování, měření tlaku na prvním válci, s rekuperací

Přílohy/p_prvni.png – graf z testování, měření tlaku na prvním válci, bez rekuperace

Přílohy/Schematic.tiff – export z programu FluidSim, elektropneumatické schéma zapojení

Přílohy/Test s 25 l kompresorem_bez_RKP.png – graf z testování s 25 l kompresorem, bez rekuperace

Přílohy/ Test s 25 l kompresorem_RKP.png – graf z testování s 25 l kompresorem, s rekuperací

Přílohy/Zapojení bez RKP.jpg – fotografie zapojení bez rekuperace

Přílohy/Zapojení s RKP.jpg – fotografie zapojení s rekuperací